Excellence scientifique • Protection et conservation des ressources • Bénéfices aux Canadiens
Scientific Excellence • Resource Protection & Conservation • Benefits for Canadians

Réouverture de la lagune du Havre aux Basques
Étude numérique des conditions d'écoulement

J. F. Bellemare, Y. Ropars, Y Matte et Y. Vigneault

Ministère des Pêches et des Océans
Direction de la Gestion des pêches et de l'habitat
Division de la Gestion de l'habitat du poisson
Gare maritime Champlain, C. P. 15 500
901, Cap Diamant, Québec, Qc, G1K 7Y7

Août 1992

Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques No 1871

Pêches et Océans Fisheries and Oceans

Canada

93-02602/

Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques

Les rapports techniques contiennent des renseignements scientifiques et techniques qui constituent une contribution aux connaissances actuelles, mais qui ne sont pas normalement appropriés pour la publication dans un journal scientifique. Les rapports techniques sont destinés essentiellement à un public international et ils sont distribués à cet échelon. Il n'y a aucune restriction quant au sujet ; de fait, la série reflète la vaste gamme des intérêts et des politiques du ministère des Pêches et des Océans, c'est-à-dire les sciences halieutiques et aquatiques.

Les rapports techniques peuvent être cités comme des publications complètes. Le titre exact paraît au-dessus du résumé de chaque rapport. Les rapports techniques sont résumés dans la revue *Résumés des sciences aquatiques et halieutiques*, et ils sont classés dans l'index annuel des publications scientifiques et techniques du Ministère.

Les numéros 1 à 456 de cette série ont été publiés à titre de rapports techniques de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada. Les numéros 457 à 714 sont parus à titre de rapports techniques de la Direction générale de la recherche et du développement, Service des pêches et de la mer, ministère de l'Environnement. Les numéros 715 à 924 ont été publiés à titre de rapports techniques du Service des pêches et de la mer, ministère des Pêches et de l'Environnement. Le nom actuel de la série a été établi lors de la parution du numéro 925.

Les rapports techniques sont produits à l'échelon régional mais numérotés à l'échelon national. Les demandes de rapports seront satisfaites par l'établissement auteur dont le nom figure sur la couverture et la page du titre. Les rapports épuisés seront fournis contre rétribution par des agents commerciaux.

Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences

Technical reports contain scientific and technical information that contributes to existing knowledge but which is not normally appropriate for primary literature. Technical reports are directed primarily toward a worldwide audience and have an international distribution. No restriction is placed on subject matter and the series reflects the broad interests and policies of the Department of Fisheries and Oceans, namely, fisheries and aquatic sciences.

Technical reports may be cited as full publications. The correct citation appears above the abstract of each report. Each report is abstracted in *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts* and indexed in the Department's annual index to scientific and technical publications.

Number 1-456 in this series were issued as Technical Reports of the Fisheries Research Board of Canada. Numbers 457-714 were issued as Department of the Environment, Fisheries and Marine Service, Research and Development Directorate Technical Reports. Numbers 715-924 were issued as Department of Fisheries and the Environment, Fisheries and Marine Service Technical Reports. The current series name was changed with report number 925.

Technical reports are produced regionally but are numbered nationally. Requests for individual reports will be filled by the issuing establishment listed on the front cover and title page. Out-of-stock reports will be supplied for a fee by commercial agents.

Rapport technique canadien des
sciences halieutiques et aquatiques
No 1871

Août 1992

Réouverture de la lagune du Havre aux Basques
Étude numérique des conditions d'écoulement

par

J.F. Bellemare[1], Y. Ropars[2], Y. Matte[3], Y. Vigneault *

Ministère des Pêches et des Océans
Direction de la Gestion des pêches et de l'habitat
Division de la Gestion de l'habitat du poisson
Gare maritime Champlain, C.P. 15 500
901, Cap Diamant
Québec (Québec)
G1K 7Y7

---

1 ROCHE Ltée Groupe-conseil, anciennement de SOGÉCO Inc.
3075, chemin des Quatre-Bourgeois, Ste-Foy (Québec) G1W 4X5
2 Travaux Publics Canada, Gare maritime Champlain
901, Cap Diamant, Québec (Québec) G1K 4K1
3 Les Experts-Conseils SOGÉCO Inc. 253, rue St-Paul, 4e étage, Québec (Québec) G1K 8C1

Ministère des Approvisionnements et Services Canada 1992
No de catalogue Fs 97-6/1871F ISSN 0706-6570

On devra référer comme suite à cette publication

Bellemare, J.-F., Ropars, Y., Matte Y., et Y. Vigneault. 1992. Étude numérique des conditions d'écoulement, Réouverture de la lagune du Havre aux Basques, Île-de-la-Madeleine. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1871: X + 60 p.

TABLE DES MATIÈRES

Page

LISTE DES TABLEAUX VI

LISTE DES FIGURES VII

RÉSUMÉ IX

ABSTRACT IX

PRÉFACE X

INTRODUCTION 1

GÉNÉRALITÉS 1

PROBLÉMATIQUE 1

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE 1

MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE 4

DESCRIPTION DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE 4

APPLICATION DU MODÈLE À LA LAGUNE DU HAVRE AUX BASQUES 4
Stratégie d'analyse 4
Intégration des données de base 4
Délimitation du domaine d'étude 4
Frontières fermées - Littoral 4
Frontières ouvertes - Baie de Plaisance 4
Discrétisation du milieu 6
Lagune 6
Passe 6
Zone de transition 7
Baie de Plaisance 7
Rattachement des cartes 7
Maillage 7
Conditions aux limites du modèle 7
Contour fermé - Berges 7
Contour ouvert - baie de Plaisance 11
Conditions initiales 11
Choix des paramètres d'ajustement 11
Type de résultats présentés 12

CONDITIONS D'AVANT FERMETURE 12

MODÈLE GÉOMÉTRIQUE 12

SIMULATION 12

PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS (CONDITIONS D'AVANT FERMETURE) 13
Vitesses d'écoulement 13
Forces tractrices 13
Partage des débits 13
Prisme de marée 13
Lignes d'eau et niveaux d'eau 13
Stabilité de la passe 14

CONDITIONS RÉAMÉNAGÉES - SIMULATION DES VARIANTES D'AMÉNAGEMENT 21

VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 1 (Ouellet et Ropars, 1989) 21
Description de la variante 21
Modèle géométrique 21
Simulation 21
Présentation et analyse des résultats 21
Vitesses d'écoulement 21
Forces tractrices 21
Partage des débits 22
Prisme de marée 22
Lignes d'eau et niveaux d'eau 22
Comparaison avec les conditions d'avant fermeture 22
Caractéristiques hydrauliques 22
Stabilité 22

VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 2 29
Description de la variante 29
Bathymétrie 29
Modèle géométrique 29
Présentation et analyse des résultats 30
Vitesses d'écoulement 30
Forces tractrices 30
Partage des débits 30
Prisme de marée 30
Lignes d'eau et niveaux d'eau 30

VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 3 37
Description de la variante 37
Modèle géométrique 37
Simulation 37
Présentation et analyse des résultats 37
Vitesses d'écoulement 38
Forces tractrices 38
Partage des débits 38
Prisme de marée 38

Lignes d'eau et niveaux d'eau 38

STABILITÉ DE LA PASSE - COMPARAISON ENTRE LES VARIANTES 44
Variante no 1 44
Variante no 2 44
Variante no 3 45

ORIENTATION DES COURANTS AU DROIT DU FUTUR PONT 45

REPRÉSENTATION PAR TRAJECTOIRES D'ÉCOULEMENT 45
Variante no 2 45
Variante no 3 45

CONCLUSIONS 54

MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE 54

CONDITIONS D'AVANT FERMETURE 54

VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 1 54

VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 2 54

VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 3 54

ORIENTATION DES COURANTS AU DROIT DE L'AXE DE LA ROUTE 55

RECOMMANDATIONS 55

RÉFÉRENCES 55

ANNEXE

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
1	Données disponibles pour la confection des modèles géométriques	6
2	Variante no 1 : caractéristiques de la marée en trois points du domaine	28
3	Variante no 2: caractéristiques de la maree en trois points du domaine	36
4	Définition des classes pour l'indice I_m	46
5	Angles inscrits entre les trajectoires d'écoulement et la direction normale à l'axe de la route – condition de jusant	46
6	Angles inscrits entre les trajectoires d'écoulement et la direction normale à l'axe de la route – condition de flot	47
7	Relations de base du modèle numérique	58

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1	Îles-de-la-Madeleine - Lagune Havre aux Basques	2
2	Passe de la dune de l'est - Conditions d'avant fermeture	3
3	Passe de la dune de l'est - Conditions actuelles	5
4	Bathymétrie récente de la lagune	8
5	Bathymétrie de la passe d'entrée en 1955	8
6	Relevé topographique de la dune de l'est	9
7	Signal de marée utilisé	9
8	Conditions d'avant fermeture - Bathymétrie de la zone de transition	10
9	Bathymétrie récente de la baie de Plaisance	10
	CONDITIONS D'AVANT-FERMETURE	
10	Maillage	15
11	Maillage au voisinage de la passe	15
12	Bathymétrie discrétisée au voisinage de la passe	16
13	Vecteurs - vitesse au jusant	17
14	Vecteurs - vitesse au flot	17
15	Force tractrice au jusant (marée 1,0 m)	18
16	Force tractrice au flot (marée 1,0 m)	18
17	Évolution du débit en différentes sections	19
18	Localisation des sections de calcul du débit	19
19	Profils en long dans le chenal du flot et du jusant	20
20	Variation du niveau d'eau dans la passe et dans la lagune	20
	VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 1	
21	Localisation et coupes types	23
22	Maillage	24
23	Bathymétrie discrétisée	24
24	Vecteurs - vitesse au jusant	25
25	Vecteurs - vitesse au flot	25
26	Force tractrice au jusant (marée 1,0 m)	26
27	Force tractrice au flot (marée 1,0 m)	26
28	Évolution du débit en différentes sections	27
29	Profils en long dans le chenal du flot et du jusant	27
30	Variation du niveau d'eau dans la passe et dans la lagune	28
	VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 2	
31	Vue d'ensemble	31
32	Maillage	32
33	Bathymétrie discrétisée	32
34	Vecteurs - vitesse au jusant	33
35	Vecteurs - vitesse au flot	33
36	Force tractrice au jusant (marée 1,0 m)	34
37	Force tractrice au flot (marée 1,0 m)	34
38	Évolution du débit en différentes sections	35
39	Profils en long dans le chenal au flot et au jusant	35
40	Variation du niveau d'eau dans la passe et dans la lagune	36

VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 3
41 Vue d'ensemble 39
42 Maillage 40
43 Bathymétrie discrétisée 40
44 Vecteurs – vitesse au jusant 41
45 Vecteurs – vitesse au flot 41
46 Force tractrice au jusant (marée 1,0 m) 42
47 Force tractrice au flot (marée 1,0 m) 42
48 Profils en long dans le chenal au flot et au jusant 43
49 Profils en long dans la passe et dans la lagune 43

VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 1
50 Indice de mouvement des matériaux de fond au jusant 48
51 Indice de mouvement des matériaux de fond au flot 48

VARIVANTE D'AMÉNAGEMENT NO 2
52 Indice de mouvement des matériaux de fond au jusant 49
53 Indice de mouvement des matériaux de fond au flot 49

VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 3
54 Indice de mouvement des matériaux de fond au jusant 51
55 Indice de mouvement des matériaux de fond au flot 51

VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 2
56 Trajectoires d'écoulement au jusant 52
57 Trajectoires d'écoulement au flot 52

VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 3
58 Trajectoire d'écoulement au jusant 53
59 Trajectoire d'écoulement au flot 53

RÉSUMÉ

Un modèle numérique bidimensionnel basé sur la méthode des éléments finis a été utilisé pour analyser différentes variantes d'aménagement proposées pour la réouverture de la lagune du Havre aux Basques aux Îles-de-la-Madeleine. Plus particulièrement, le modèle a servi à préciser les profondeurs du chenal, sa géométrie ainsi que sa localisation en fonction des écoulements de marée de la passe d'entrée et de la lagune. Les résultats obtenus sont comparés et analysés en vue de faire des recommandations sur la variante d'aménagement en regard de la stabilité du chenal.

ABSTRACT

A two-dimensionnal model based on finite element method has been used to analyse different possible design solutions envisaged for the re-opening of Havre aux Basques lagoon in Magdalen Islands located in the middle of the Gulf of St. Lawrence. More specifically, the study has been conducted to better define channel depths, its geometry and its location as fonction of tidal flows within the inlet and the lagoon. Results obtained from the model have been compared and analysed in order to put forward some recommendations on the proposed control works solutions which could insured tidal inlet stability.

PRÉFACE

Depuis 1984, la Division de la Gestion de l'habitat du poisson du ministère des Pêches et des Océans du Canada étudie la possibilité de rouvrir la lagune du Havre aux Basques. Cette étude réalisée à l'aide d'un modèle bidimensionnel, vise à déterminer les caractéristiques d'un chenal d'écoulement stable. Plusieurs variantes sont étudiées dont celle proposée dans l'étude hydrosédimentologique réalisée par Ouellet et Ropars en 1989. L'analyse des résultats, l'interprétation de ceux-ci ainsi que la détermination des variantes étudiées ont été réalisées en collaboration avec Travaux Publics Canada ainsi que le département de Génie Civil de l'Université Laval.

Finalement, nous tenons à remercier monsieur Yvon Ouellet, professeur au Département de génie civil de l'Université Laval ainsi que monsieur Louis Désilets du ministère des Pêches et des Océans du Canada pour leur collaboration à ce rapport.

INTRODUCTION

GÉNÉRALITÉS

La lagune du Havre aux Basques est située dans la partie sud des Îles-de-la-Madeleine, entre Havre-Aubert et Cap-aux-Meules (figure 1). Le milieu lagunaire qui procure un habitat de choix à différentes espèces marines, est caractérisé par différentes passes qui assurent le passage des eaux de mer au rythme des marées.

En 1956, suite au parachèvement de la route 199, la passe de la dune de l'Est, qui était la plus importante voie de pénétration des eaux de mer dans la lagune du Havre aux Basques, fut fermée, privant ainsi la lagune des échanges d'eau avec la baie de Plaisance. Le milieu lagunaire s'éteignit pour faire place à une étendue d'eau stagnante et de faible salinité, milieu improductif à la croissance des espèces commerciales telles que le homard, le hareng et la plie.

Depuis 1984, la Division de la Gestion de l'habitat du poisson du ministère des Pêches et des Océans du Canada, étudie la possibilité de rouvrir la lagune du Havre aux Basques, des études économiques ayant révélé la faisabilité du projet.

PROBLÉMATIQUE

Les passes naturelles qui subissent tout au long de leur existence différentes phases d'évolution présentent différents niveaux de stabilité, selon leurs caractéristiques géométriques et l'importance des sollicitations naturelles telles que la marée et les vagues. D'après l'étude hydrosédimentologique réalisée en 1989 (Ouellet et Ropars, 1989), la passe au sud de la dune de l'Est aurait été, avant sa fermeture de 1956, l'ouverture la plus stable de la lagune du Havre aux Basques. Ses dimensions et sa géométrie lui auraient permis de demeurer ouverte à long terme (figure 2).

La fermeture de la passe en 1956 élimina la propagation de la marée dans la lagune, ce qui conduisit à l'ensablement progressif du chenal d'accès par les sables en dérive littorale, jusqu'à l'atteinte d'un profil de plage régulier (figure 3). Une fosse d'environ 100 m de diamètre, située à l'est de la route 199, constitue le dernier vestige de la présence du chenal d'entrée.

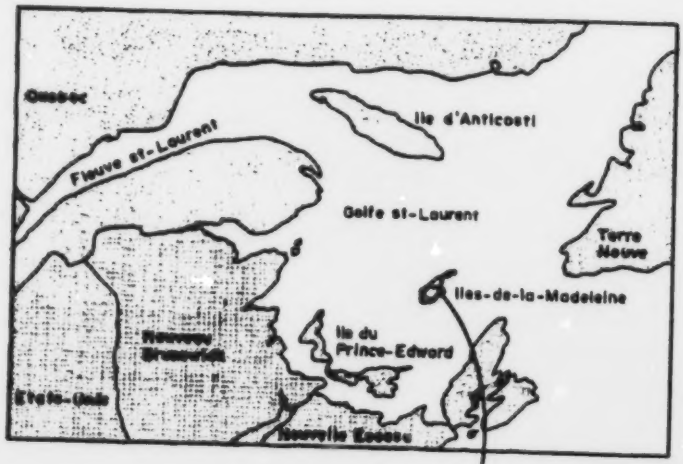
La réouverture de la passe impliquera la démolition locale de l'infrastructure routière, la construction d'un pont et la redéfinition d'une nouvelle passe par travaux de dragage. La géométrie de la passe devra garantir sa stabilité en regard des conditions hydrauliques liées à la propagation de la marée et d'autres aspects tels que l'action des vagues et le transport littoral. Ces points furent traités dans l'étude hydrosédimentologique (Ouellet et Ropars, 1989), ce qui conduisit à la définition d'une variante d'aménagement basée sur les caractéristiques de la passe naturelle.

Afin d'étudier les écoulements engendrés par la propagation de la marée et d'établir plus précisément les profondeurs du chenal, sa géométrie et sa localisation, la modélisation numérique des écoulements dans la passe et la lagune fut recommandée par l'étude hydrosédimentologique et appuyée par Transport Québec.

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objectif général de l'étude consiste à modéliser les courants de marée dans la lagune et dans la passe d'entrée pour différentes variantes d'aménagement. Les objectifs spécifiques suivants sont visés:

- Élaboration d'une méthodologie pour la simulation des écoulements résultant de la marée;
- Modélisation des conditions d'avant fermeture (1956);
  - -Construction d'un modèle géométrique
  - -Simulation des écoulements
  - -Illustration et analyse des résultats
- Modélisation de variantes d'aménagement de la passe;



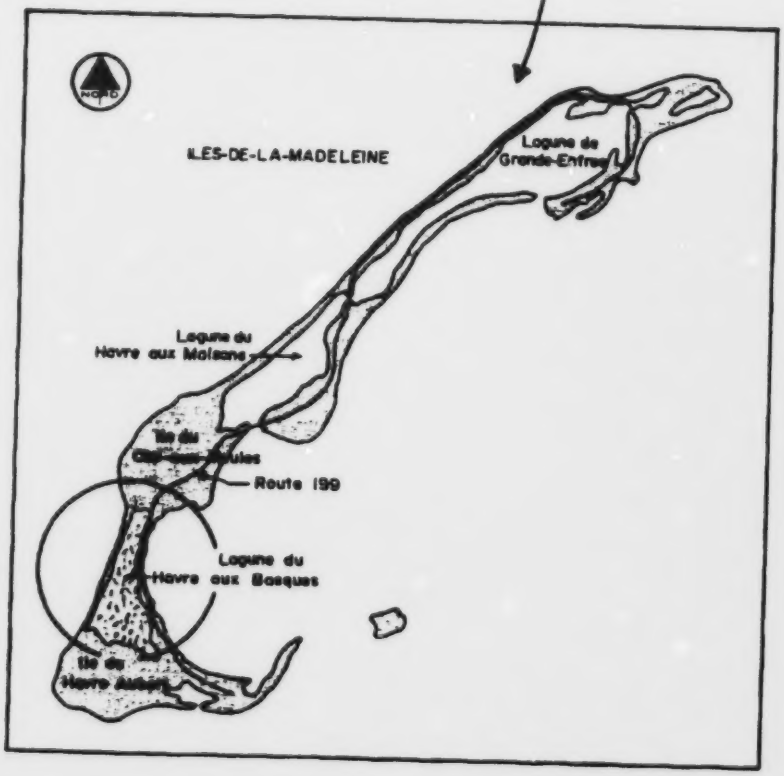


Figure 1 – Iles-de-la-Madelaine – Lagune Havre aux Basques

Figure 2 – Passe de la dune de l'est – Conditions d'avant fermeture

  - Construction des modèles géométriques
  - Simulation des écoulements
  - Illustration et analyse des résultats
- Comparaison avec les conditions d'avant fermeture;
- Recommandation d'une variante d'aménagement en regard de la stabilité du chenal;
- Détermination de l'orientation des courants au droit du futur pont.

MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

DESCRIPTION DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE

Le lecteur trouvera, en annexe, un bref résumé de la théorie du modèle utilisé ainsi que ses principales caractéristiques.

APPLICATION DU MODÈLE À LA LAGUNE DU HAVRE AUX BASQUES

Stratégie d'analyse

Comme le comportement hydrodynamique de la lagune du Havre aux Basques est essentiellement défini par les conditions de marée, une analyse non stationnaire sera réalisée pour décrire adéquatement de telles conditions. Il s'agit de réaliser le calcul des écoulements correspondant aux conditions d'avant fermeture de la lagune (époque antérieure à 1956). Il sera utilisé par la suite comme référence pour l'analyse des conditions réaménagées. Par la suite, on procède à la modélisation des solutions envisagées pour la réouverture de la lagune. Les différents aspects étudiés sont la position et la géométrie du chenal, la stabilité du chenal, le comportement hydrodynamique global et l'orientation des courants au droit du futur pont.

Intégration des données de base

L'élaboration du milieu discret des conditions d'avant fermeture requiert la connaissance des caractéristiques physiques de quatre zones: la lagune du Havre aux Basques, la passe d'entrée, la zone de transition entre l'entrée proprement dite et la baie de Plaisance. Les informations de base sont constituées principalement de cartes bathymétriques de la zone d'étude, de photographies aériennes et de plans définissant la position des berges.

Délimitation du domaine d'étude

Les frontières du domaine à l'étude ont été définies comme suit:

Frontières fermées - Littoral. Les fluctuations du niveau d'eau associées à la propagation de la marée font varier la position du littoral qui constitue donc une inconnue du problème. Toutefois, la position de cette frontière peut être positionnée à mi-chemin entre la ligne des hautes eaux et des basses eaux de manière à minimiser l'erreur sur les volumes accumulés ou évacués sur les estrans.

Frontières ouvertes - Baie de Plaisance. Cette limite doit être située suffisamment loin de la zone d'intérêt pour garantir des conditions d'approche réaliste, et dans une zone cohérente avec le type de conditions aux limites utilisées. Dans ce cas-ci, on spécifie un signal de marée synthétique d'une amplitude de 1,0 mètre. Les conditions favorables à l'imposition d'un signal homogène, se retrouvent dans les plus grandes profondeurs présentant de faibles variations dans la bathymétrie et où les vitesses d'écoulement demeurent relativement faibles.

Nous avons donc choisi, pour les raisons citées précédemment, de faire correspondre la limite est du domaine à l'isobathe de 8,0 m. Les frontières ouvertes nord et sud étant placées à une distance égale de la zone d'intérêt (passe).

Figure 3 – Passe de la dune de l'est – conditions actuelles

Ce choix constitue un compromis entre une limite inutilement éloignée dans la baie (et dispendieuse en terme de discrétisation) et une limite trop rapprochée de la passe qui rendrait difficile l'imposition des conditions de marée.

Discrétisation du milieu

Des opérations ont été effectuées afin de rattacher les différentes cartes bathymétriques utilisées à un système de coordonnées global et à un niveau de référence commun qui, pour la présente étude, correspond au zéro marégraphique (zéro des cartes). Une fois cette étape de rattachement terminée, la réalisation des modèles géométriques des quatre sous-domaines a été réalisée (lagune, passe, zone de transition et baie de plaisance).

L'intégration d'une bathymétrie fiable assurant la couverture du domaine à modéliser s'est avérée assez difficile compte tenu de la disparité des ensembles de données au niveau de l'échelle des cartes de travail et de l'époque respective des prises de mesures. Les différentes cartes qui ont été considérées sont énumérées dans le tableau 1.

Lagune. En ce qui a trait à la lagune, nous avons utilisé la bathymétrie de 1988 (figure 4) qui constitue la source de données la plus complète pour les besoins de la modélisation. Le choix de cette bathymétrie pour la confection du modèle géométrique des conditions d'avant fermeture, demeure justifié compte tenu du peu de modifications des fonds dans la lagune suite à sa fermeture, les apports sédimentologiques, ainsi que les courants étant demeurés faibles durant cette période. Les principales structures bathymétriques sur ce plan sont présentes sur la photographie aérienne de la figure 2.

Une correction de 1,05 m (niveau dans la lagune; Ouellet 1989) a été apportée aux différentes cotes pour le rattachement au zéro marégraphique de Cap-aux-Meules.

Passe. Le plan de 1955 (figure 5) fourni par Travaux Publics Canada et provenant de Transport Québec, couvre la partie ouest de la passe et a été utilisé prioritairement pour la description des conditions d'avant fermeture de la passe. Pour les différentes variantes d'aménagement, les schémas

Tableau 1 Données disponibles pour la confection des modèles géométriques

Zone couverte	Organisme	Date	Échelle	Type de couverture	Rattachement
Lagune	S.H.C.	1990	1/20 000	Partielle: topographie et zone de prés salés	Zéro des sondes
	Pêches & Océans (Lapel)	1988	1/10 000	Totale (à l'exception des prés salés)	Niveau d'eau dans la lagune
	S.H.C.	1931-1934	1/48 000	Partielle: chenaux principaux	Zéro marégraphique
Passe	T.Q.	1955	1/1 000	Zone de 400 m x 650 m montrant le détail de la passe	Géodésique
Zone de Transition	S.H.C.	1923-1924	1/48 200	Littoral des Îles-de-la-Madeleine	Zéro marégraphique
Baie de Plaisance	S.H.C.	1929-1934	1/72 960	Minutes hydrographiques de l'ensemble de la Baie: peu détaillées dans la zone d'étude	Zéro marégraphique
	S.H.C.	1990	1/20 000	Minutes hydrographiques détaillées de l'ensemble de la Baie	Zéro des sondes
	S.H.C.	1931-1934	1/48 000	Bathymétrie au large seulement	Zéro marégraphique

fournis par Pêches et Océans et Travaux Publics Canada ont été utilisés. Le relevé bathymétrique de la figure 6 réalisé par le groupe Lapel pour le compte de Pêches & Océans a aussi été utilisé. Cette carte précise aussi l'élévation de la plage et le profil du littoral.

Zone de transition. Cette zone est définie uniquement pour les conditions d'avant fermeture. Comme montré sur la figure 2, la passe d'entrée présente, du côté de la baie de Plaisance, une structure bathymétrique de forme deltaïque. Cette forme, qui doit être prise en compte pour modéliser adéquatement les échanges entre la lagune et la baie de Plaisance, n'est pas couverte dans son ensemble par la bathymétrie de 1956. La source de données la plus complète nous permettant de reconstituer cette "zone de transition" est la carte des minutes hydrographiques (#584) qui date de 1923. L'examen des contours reconstitués sur la figure 8 démontre une bonne représentation de la zone de transition en comparaison avec les photographies aériennes.

Baie de Plaisance. L'analyse des différentes cartes bathymétriques de la baie de Plaisance nous démontre que, pour les profondeurs supérieures à trois (3) mètres, les changements survenus depuis la fermeture de la lagune, ne sont pas significatifs compte tenu des faibles variations bathymétriques dans cette zone et de la précision requise pour fin d'analyse. Nous avons donc opté, pour la couverture de la partie du domaine située dans la baie de Plaisance et à l'extérieur de la "zone de transition", pour la carte des minutes hydrographiques du S.H.C. (1990). La zone d'intérêt pour la présente étude est illustrée sur la figure 9. La superposition des contours de cette carte, avec ceux de 1923, démontre une bonne concordance entre les bathymétries qui toutes deux présentent des variations plutôt linéaires, typiques des milieux côtiers.

Rattachement des cartes

La modélisation nécessite que l'ensemble des données bathymétriques et de géométrie soit défini dans un système de coordonnées global. Ainsi les cartes de base ont dû être réduites ou agrandies selon le cas, à une échelle commune et rattachées à un système de coordonnées global à l'aide de points de repères fiables. Précisons à cet égard que le modèle n'utilise aucune distorsion dans le plan ou dans la verticale. Les principales structures ou formes qui ont été considérées pour le rattachement des cartes sont:

- l'axe de la route;
- la position du chenal d'entrée;
- les différentes structures bathymétriques: fosses, hauts fonds;
- les isobathes communes.

Maillage

Le maillage est constitué d'éléments triangulaires dont la densité a été ajustée en fonction des variations prévisibles dans l'écoulement. Une quantité accrue a donc été prévue dans les zones présentant d'importantes variations bathymétriques et au voisinage de la passe. Dans les zones de moindre intérêt et de faibles gradients, la taille des éléments a été augmentée afin de ne pas alourdir inutilement les calculs.

Conditions aux limites du modèle

L'application du modèle numérique nécessite la connaissance de conditions sur les contours du domaine qui l'informeront du type d'écoulement. Ces conditions qui doivent être compatibles avec l'aspect dynamique du milieu lagunaire sont différentes selon qu'il s'agisse d'un contour fermé ou ouvert.

Contour fermé - Berges. Comme il a été expliqué précédemment, nous avons opté pour une schématisation des écoulements sur les estrans avec une condition du type "fond plat et mur". En plus de cette condition d'imperméabilité (vitesse normale nulle), une condition de glissement (vitesse tangentielle libre) est spécifiée sur les contours fermés.

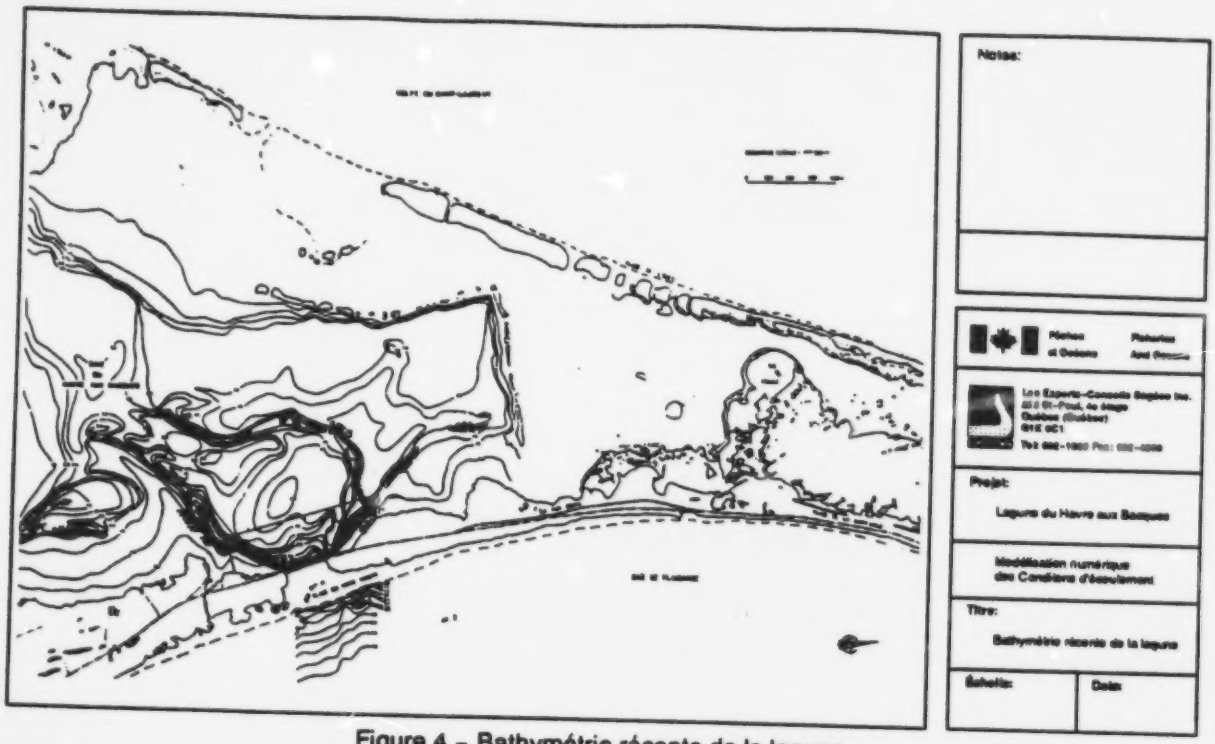


Figure 4 – Bathymétrie récente de la lagune

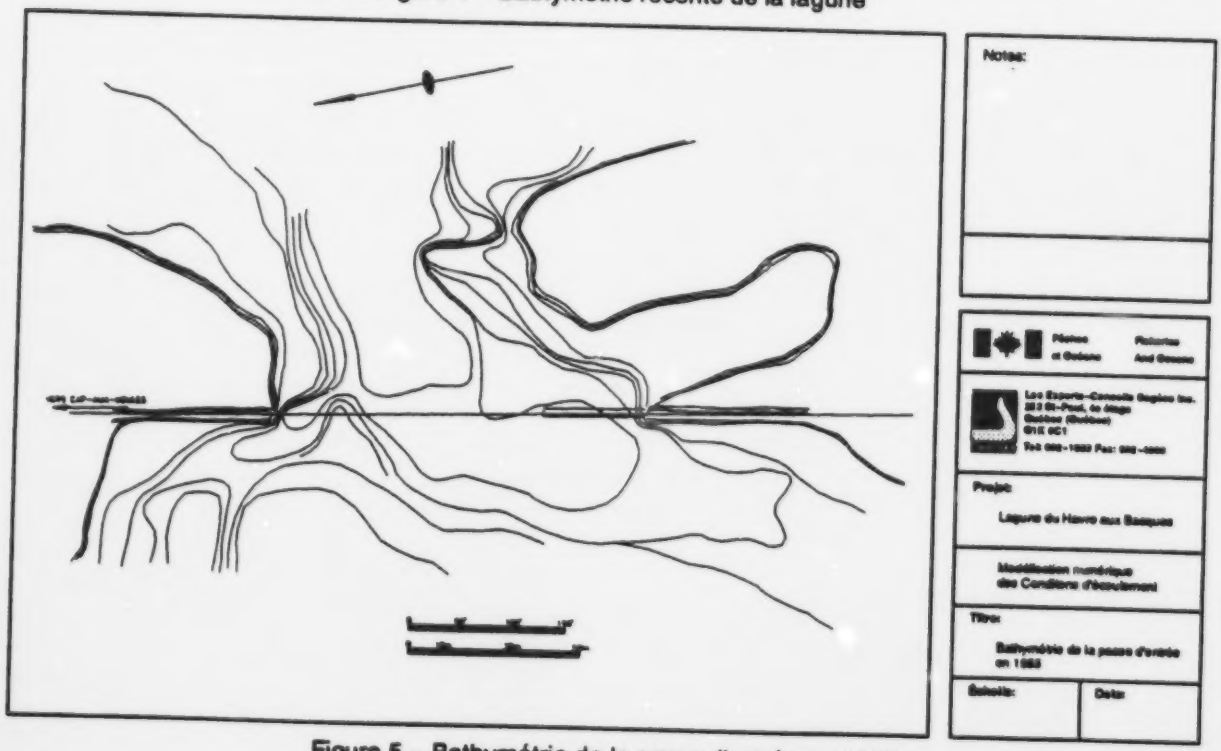


Figure 5 – Bathymétrie de la passe d'entrée en 1955

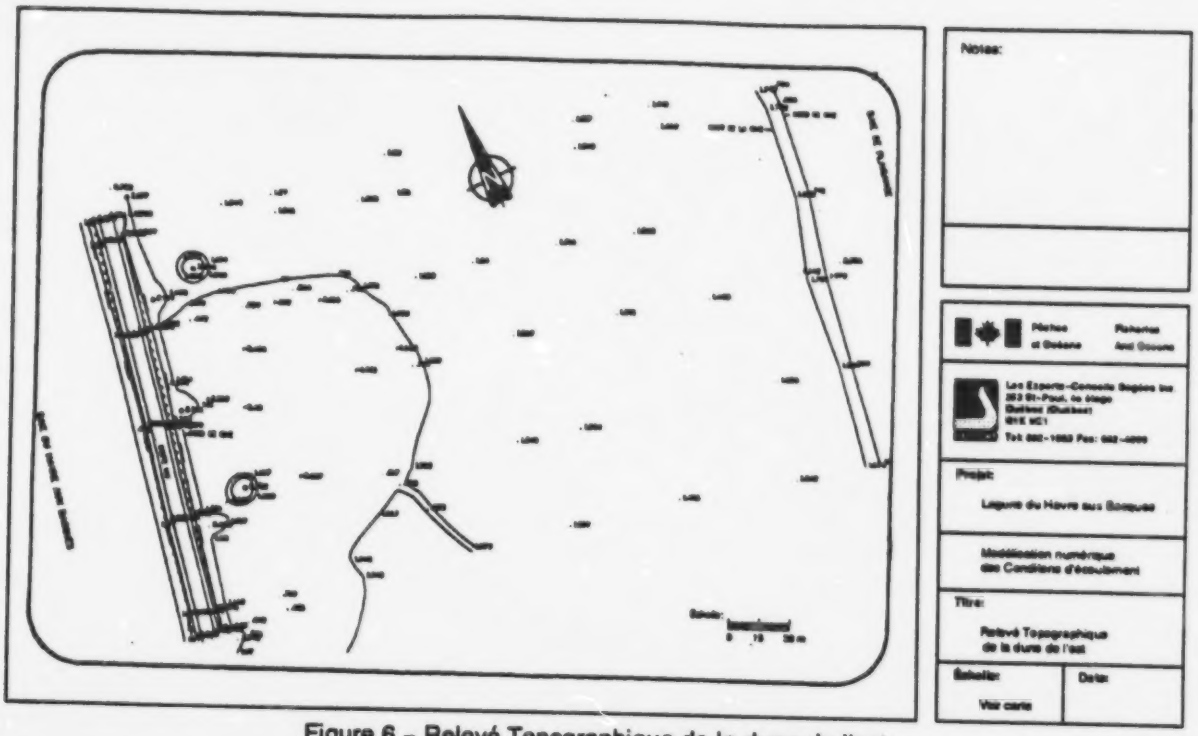


Figure 6 – Relevé Topographique de la dune de l'est

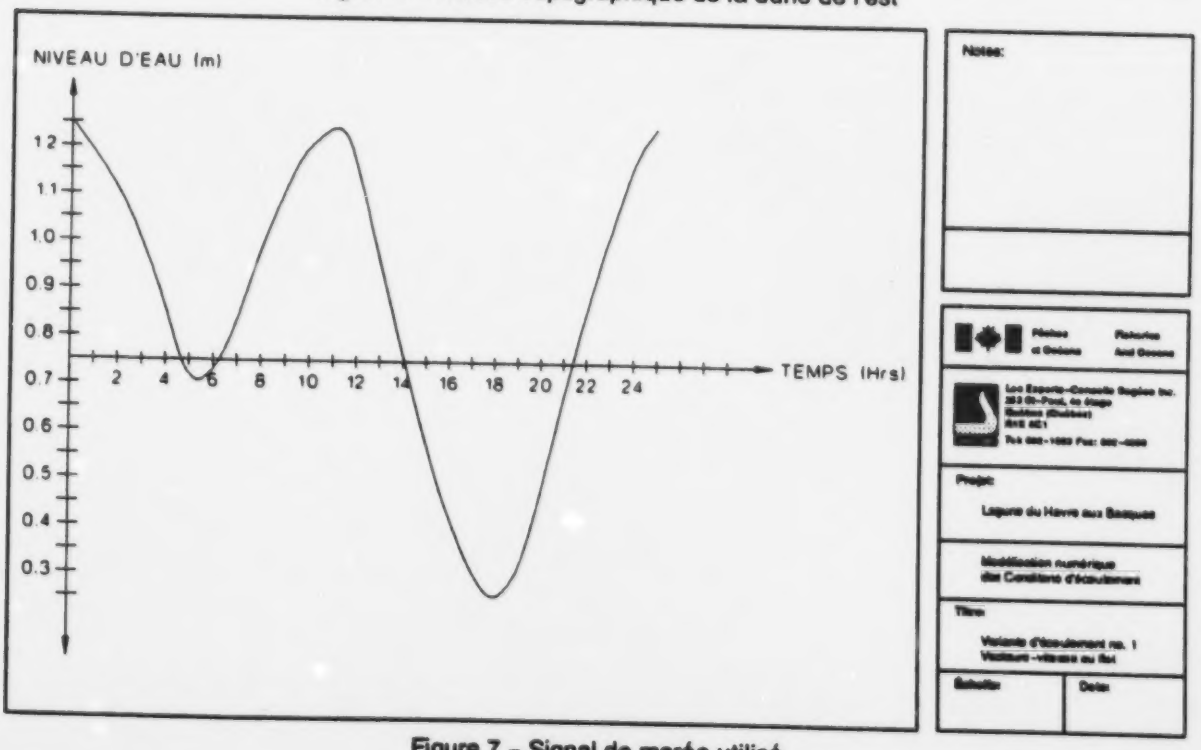


Figure 7 – Signal de marée utilisé

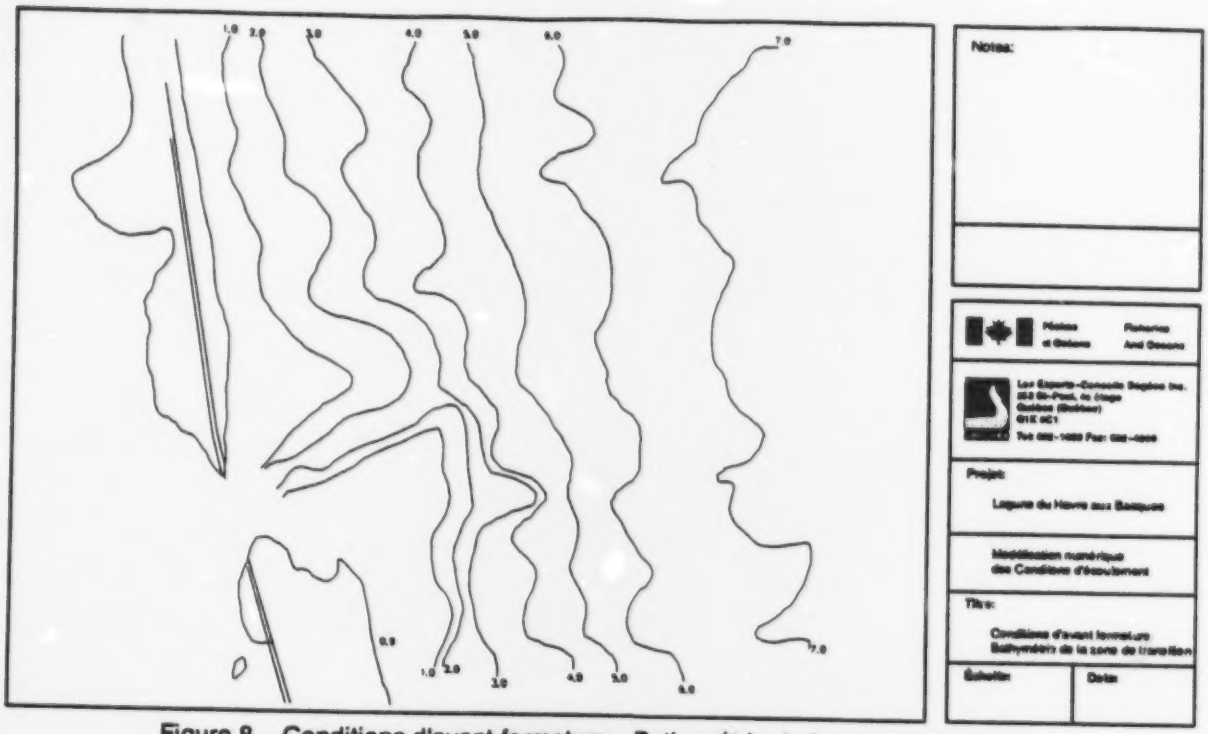


Figure 8 – Conditions d'avant fermeture – Bathymétrie de la zone de transition

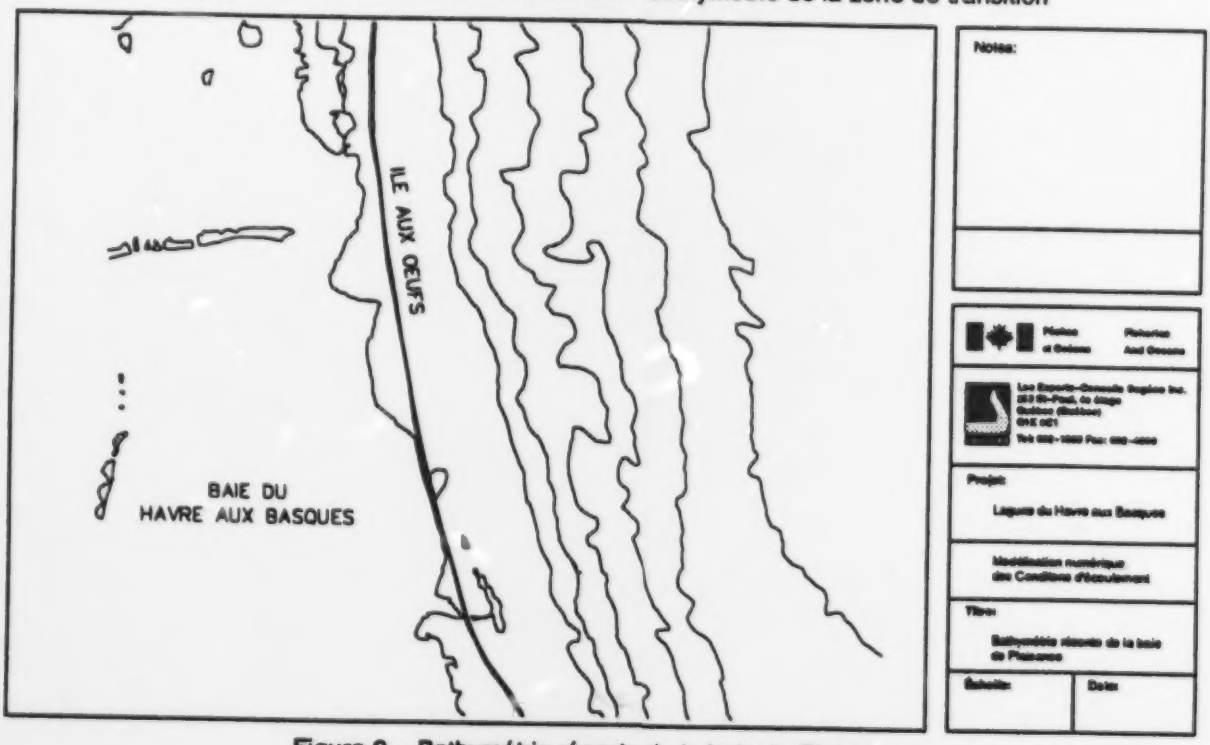


Figure 9 – Bathymétrie récente de la baie de Plaisance

Contour ouvert - baie de Plaisance. Les contours ouverts correspondent à la limite du domaine dans la baie de Plaisance. C'est à cette frontière que l'on doit spécifier la sollicitation de l'écoulement due à la marée. Comme il a été expliqué précédemment, nous avons placé cette frontière en eau profonde et à une distance suffisante de l'entrée de la lagune pour y faciliter l'imposition d'un signal de marée homogène.

Le signal de marée retenu découle d'une observation des niveaux d'eau à Havre-Aubert (station 1964) et qui sont présentés dans Ouellet et Ropars (1989). Le tracé du signal (figure 7) a été réalisé en tenant compte des traits caractéristiques suivants:

- le niveau moyen de l'eau à 0,75 m;
- le caractère semi-diurne de la marée;
- l'amplitude de la grande marée de 1,0 m;
- les périodes de jusant et de flot définies comme suit.

Les caractéristiques du signal marégraphique de référence pour les périodes de flot et de jusant sont de 7 heures pour la grande marée et de 5h25 pour la petite marée. Ces caractéristiques, qui ne proviennent pas d'une analyse statistique proprement dite, ont été déduites de l'examen des courbes de marée prédites à Havre-Aubert au mois d'octobre 1988.

Conditions initiales

Les conditions initiales consistent en une solution de démarrage pour la résolution du problème non permanent. Comme il n'existe pas de solution connue à priori, on utilisera un champ de vitesse nul à la grandeur du domaine et un niveau d'eau uniforme correspondant à une mer supérieure. Cette représentation vise à schématiser une condition d'étale où les vitesses et les gradients sont faibles. L'expérience acquise des projets antérieurs démontre que l'erreur due à ce type de conditions initiales sera suffisamment atténuée après la simulation d'un cycle de marée utilisant un pas de temps d'une heure, soit un total de 25 pas de temps pour le signal référence.

Choix des paramètres d'ajustement

La nature plutôt déterministe des équations d'équilibre qui composent le modèle mathématique, ne permet l'ajustement que de deux paramètres: le frottement du fond et la viscosité turbulente. Dans le cas du frottement, associé au coefficient "n" de Manning, la rugosité des matériaux du lit de même que la forme des fonds (macro-rugosité) sont les principaux facteurs qui influent sur sa valeur. Quant au coefficient de viscosité turbulente "ν_t", il traduit la présence de contraintes internes dans le fluide.

Comme il n'existe pas de mesures "in situ" correspondant aux conditions d'avant fermeture, nous n'avons pas pu réaliser un étalonnage du modèle. Les valeurs retenues pour "n" et ν_t reposent sur les connaissances sédimentologiques de la lagune et l'expérience acquise jusqu'à ce jour dans l'application des modèles numériques (TAO Simulations, 1989). Le type de matériau que l'on retrouve aux îles est un sable de granulométrie uniforme possédant des particules d'un diamètre moyen (Mercier, 1987) variant entre 0,25 et 0,40 mm. En accord avec Pêches et Océans, une valeur de 0,028 a été retenue sur l'ensemble du domaine pour le coefficient de Manning. Cette valeur devrait s'avérer représentative si on considère une présence moyenne de rugosités de forme. Quant au coefficient de viscosité turbulente, nous avons opté pour la valeur constante de ν_t de 8 m^2/s, ce qui constitue un plancher minimum pour garantir la convergence du modèle.

Il est important de noter que malgré le fait que les coefficients "n" et "ν_t" n'ont pu être ajustés par voie d'étalonnage, les résultats numériques demeureront cohérents à l'ensemble des données géométriques et bathymétriques intégrées au modèle. La simulation obtenue fournira une très bonne représentation des écoulements.

Type de résultats présentés

Les résultats du modèle sont illustrés pour le jusant et le flot. Le jusant correspond au pas de temps présentant les vitesses de courant les plus grandes durant la période descendante et le flot au pas similaire associé à la période de marée montante. Différentes formes de représentation sont fournies:

- Le module de vitesse est calculé comme suit à l'aide des deux composantes du vecteur vitesse:

$$|V| = \sqrt{u^2 + v^2}$$

|V|=module de la vitesse
où
u = est la composante de la vitesse suivant la direction x;
v = est la composante de la vitesse suivant la direction y.

- Les courants sont représentés par des flèches (vecteurs) dont la longueur correspond à l'intensité du courant.

- La force tractrice qui permet de quantifier la sollicitation de l'écoulement sur le fond est évaluée à l'aide de la formule:

$$\tau = \frac{\rho |V|^2 g n^2}{H^{1/3}}$$

où
τ = force tractrice en Pascal;
ρ = masse volumique de l'eau;
g = accélération de la pesanteur;
n = coefficient de Manning;
H = profondeur d'eau;
|V| = module du vecteur des vitesses défini précédemment.

- D'autres types de représentation tels que l'indice de mouvement et les trajectoires d'écoulement ont été utilisés et seront définis plus loin.

CONDITIONS D'AVANT FERMETURE

MODÈLE GÉOMÉTRIQUE

La figure 10 illustre le maillage des conditions d'avant fermeture qui est constitué de 1 000 éléments et 1 896 noeuds. Le détail au voisinage de la passe est montré sur la figure 11. En chacun des noeuds sommets des éléments, on associe une cote correspondant à la position du fond sous le zéro marégraphique. Par la suite, on trace les isocontours interpolés linéairement à l'aide du maillage et des données bathymétriques considérées. La figure 12 présente la bathymétrie résultant de la discrétisation. La comparaison entre cette bathymétrie et les différentes cartes de base utilisées, nous permet d'apprécier la qualité de la discrétisation qui constitue un paramètre déterminant dans la représentativité des résultats du modèle numérique.

Comme en fait foi la figure 12, on remarquera une bonne correspondance avec les bathymétries mesurées, les principales structures (fosses, chenal, haut fond) étant bien définies.

SIMULATION

La stratégie préconisée pour la simulation des conditions de réouverture est simple. L'objectif étant d'établir une comparaison avec les conditions d'avant fermeture, on utilisera les mêmes valeurs des coefficients de frottement et de viscosité turbulente. Le signal de marée ainsi que les conditions aux limites du modèle sont identiques alors que la discrétisation temporelle est obtenue, comme précédemment, grâce à un pas de temps de 1,0 heure.

PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS (CONDITIONS D'AVANT FERMETURE)

Vitesses d'écoulement

L'examen du courant au jusant et au flot nous fait découvrir pour les deux cas des valeurs maximales d'environ 1 m/s. Les courants les plus importants se situent au droit de la passe, légèrement à l'est de l'axe de la route. L'écoulement présente une plus forte chenalisation qu'en période de flot, ce qui est dû à un effet accru du frottement sur les hauts fonds en période de basses eaux. La chenalisation est beaucoup moins importante au flot et l'écoulement est alors plus uniforme. On remarquera, pour les deux cas, des vitesses plus importantes dans le bras sud (côté lagune). La représentation par vecteurs courants confirme ces dernières observations (figures 13 et 14). Du côté de la baie de Plaisance, l'évacuation des eaux s'effectue principalement suivant l'axe du chenal. Les vitesses s'atténuent très rapidement à l'extrémité est du chenal pour devenir presque nulles à la limite du domaine.

Forces tractrices

La force tractrice exprime la sollicitation de l'écoulement sur le fond. Son intensité est fonction de la vitesse, de la profondeur d'eau et du coefficient de frottement. Les figures 15 et 16 illustrent ce résultat. La distribution des zones fortement sollicitées suit assez bien celles des vitesses maximales de courant.

Globalement, on retrouve des valeurs se situant entre 0 et 6 Pa. Durant le flot, la contrainte maximale se retrouve du côté sud de la passe, au droit du banc de sable où l'on retrouve de faibles profondeurs. Dans les chenaux, les sollicitations les plus importantes surviennent lors du jusant, la valeur moyenne de la force tractrice se situant près de 2,5 Pa.

Partage des débits

La figure 17 illustre les variations du débit dans les bras sud et nord du côté de la lagune ainsi que dans la passe. La figure 18 localise les trois sections considérées. On remarquera un cheminement privilégié de l'eau par le chenal sud, alors que les débits de pointes y sont d'environ 20% plus grands que dans le chenal nord. Le débit maximum dans la passe survient durant le flot et s'établit à 920 m^3/s.

Prisme de marée

Le prisme de marée, qui se définit comme la variation du volume d'eau entre la basse et la haute mer, peut être calculé de façon assez précise en tenant compte de la propagation de la marée telle que calculée par le modèle. Celui-ci s'obtient suite à l'intégration de la fonction débit:

$$P_t = \sum_{i=1}^{n} (Q_i - Q_{moy}) \Delta T$$

où

P_t =prisme de marée;
ΔT =intervalle de temps;
Q_i =débit moyen dans l'intervalle;
Q_{moy} = débit moyen dans le cycle de marée (0 m^3/s dans le cas présent);
n = nombre d'intervalles correspondant à la période de remplissage ou de vidange.

Une valeur de $14,5 \times 10^6$ m^3 est obtenue pour P_t par ce calcul.

Lignes d'eau et niveaux d'eau

Le tracé de la ligne d'eau nous permet d'estimer les pertes d'énergie par frottement dans la

passe. Les dénivelées de par et d'autre de la passe, traduisant cette perte d'énergie, s'établissent à 12 cm et 10 cm pour les conditions de jusant et de flot respectivement. La figure 19 illustre la ligne d'eau correspondant au flot et au jusant, alors que la figure 20 présente les variations du niveau d'eau dans le chenal et en deux points situés aux limites nord et ouest du domaine et localisés sur la figure 18.

Stabilité de la passe

La stabilité de la passe traduit sa prédisposition à demeurer dans des conditions de géométrie stable durant une période de temps donnée. Les principaux facteurs qui affecteront cette stabilité sont les paramètres hydrauliques liés aux courants de marée d'une part et la migration littorale des sédiments associée à la houle d'autre part. La présente étude traite du premier aspect uniquement. L'autre aspect a déjà été couvert par l'étude de Ouellet et Ropars (1989).

L'étude des milieux lagunaires démontre que les passes d'entrée subissent des modifications plus ou moins importantes sous l'action des forces en présence. Il n'existe donc pas de stabilité parfaite et il ne faudrait donc pas s'attendre à retrouver nécessairement des conditions parfaitement stables pour le cas modélisé.

L'analyse des forces tractrices et des vitesses d'écoulement nous indique que certaines zones de la passe présenteraient une mobilité des sédiments pour les conditions extrêmes de flot et de jusant, associée à une grande marée de 1,0 m. Ces zones correspondent à la barre de sable située du côté sud de la passe et à certaines parties des chenaux. Ce type de comportement nous apparaît probable, les conditions de marée considérées correspondant au pire des cas et l'énergie hydraulique étant alors suffisante pour mettre en mouvement certains dépôts. Notons que la présence de cette barre de sable est probablement liée à l'action des vagues et des vents. De telles structures bathymétriques sont appelées à se modifier à court terme mais ne devraient pas être considérées comme fondamentales dans l'analyse de la stabilité de la passe à long terme.

Les résultats du modèle présentent une image plausible correspondant à une certaine époque inscrite dans le processus évolutif de la lagune. Il s'agit d'une condition ponctuelle présentant une tendance au changement que nous qualifierons de moyenne. L'étude des variantes d'aménagement qui reposera sur une comparaison avec cet "événement de référence", devra conduire à des conditions équivalentes et si possible plus "stables" que celles retrouvées ici.

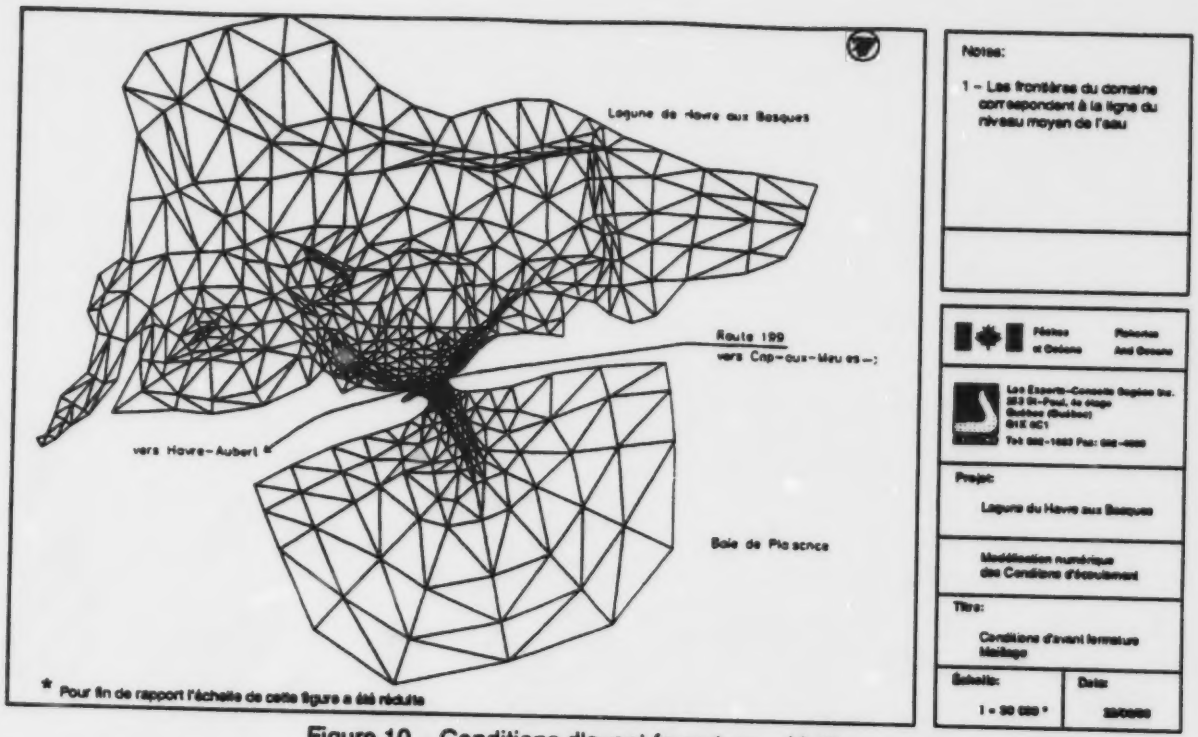


Figure 10 – Conditions d'avant fermeture – Maillage

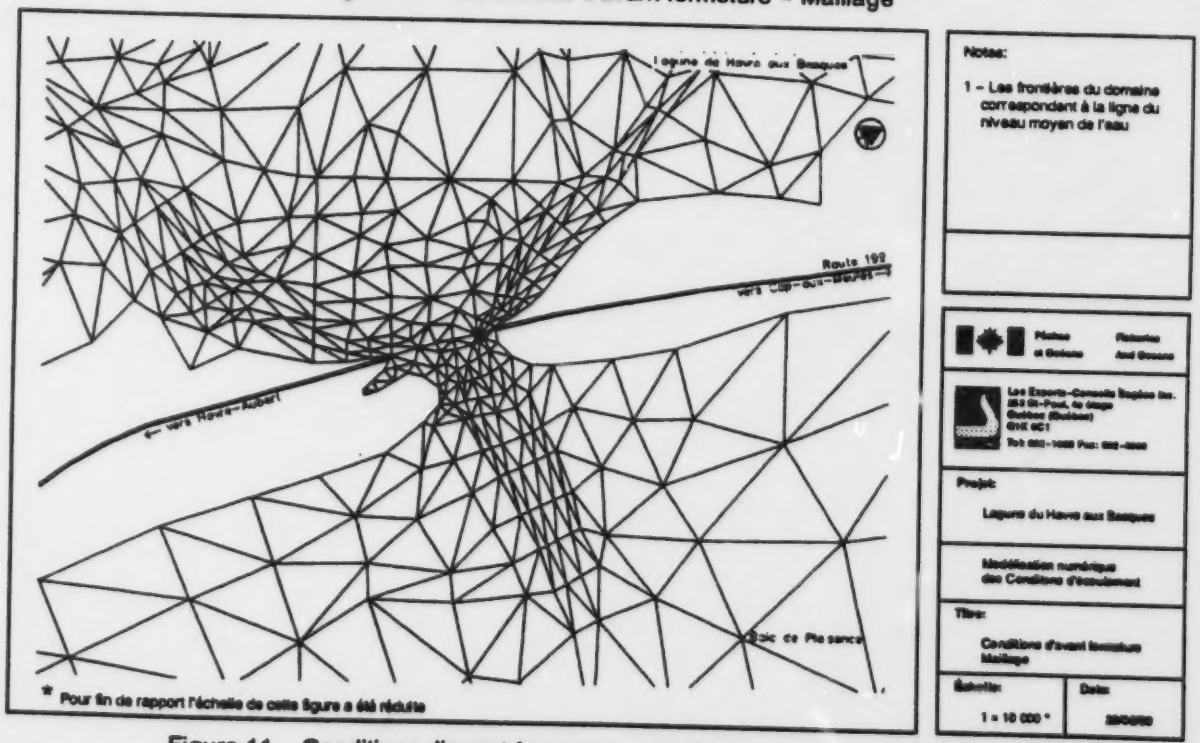


Figure 11 – Conditions d'avant fermeture – Maillage au voisinage de la passe

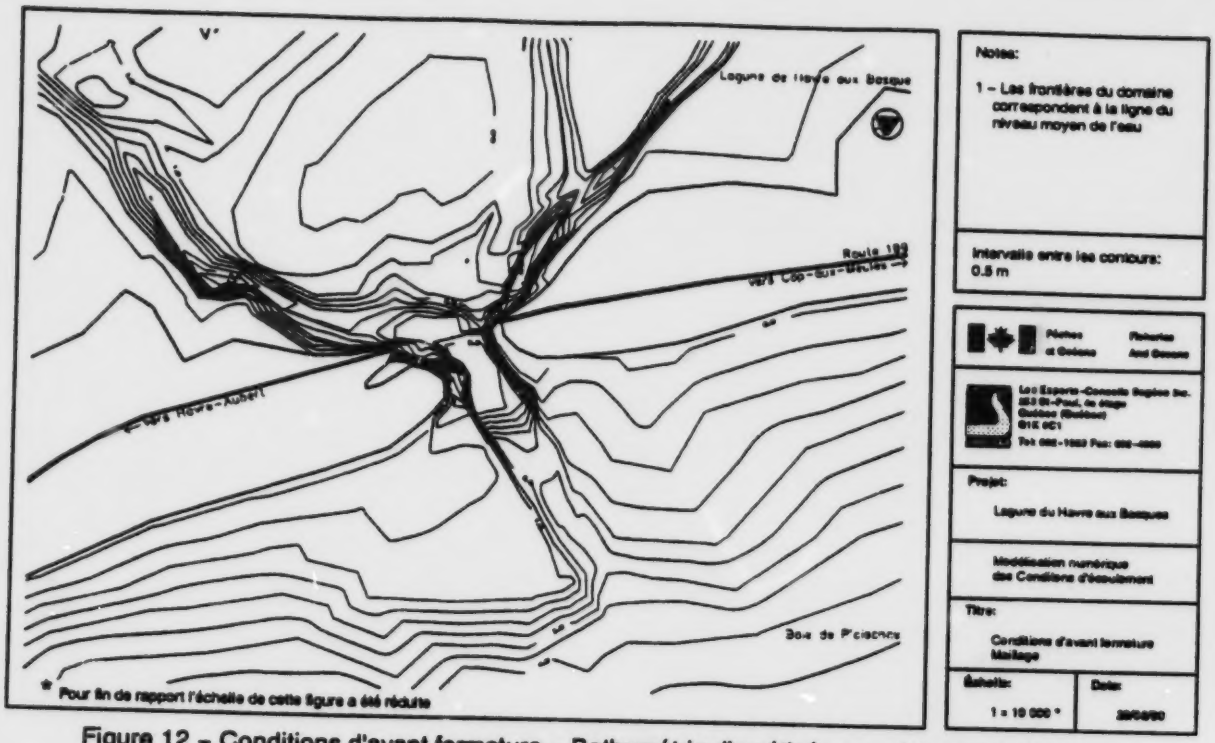


Figure 12 – Conditions d'avant fermeture – Bathymétrie discrétisée au voisinage de la passe

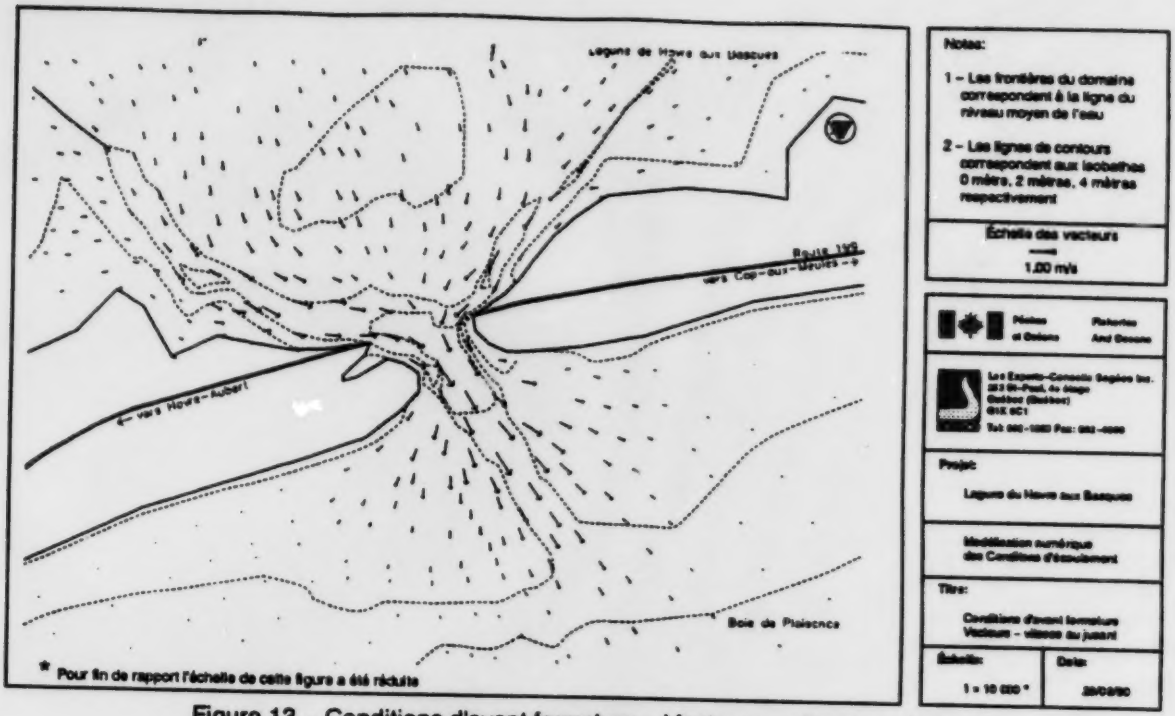


Figure 13 – Conditions d'avant fermeture – Vecteurs – vitesse au jusant

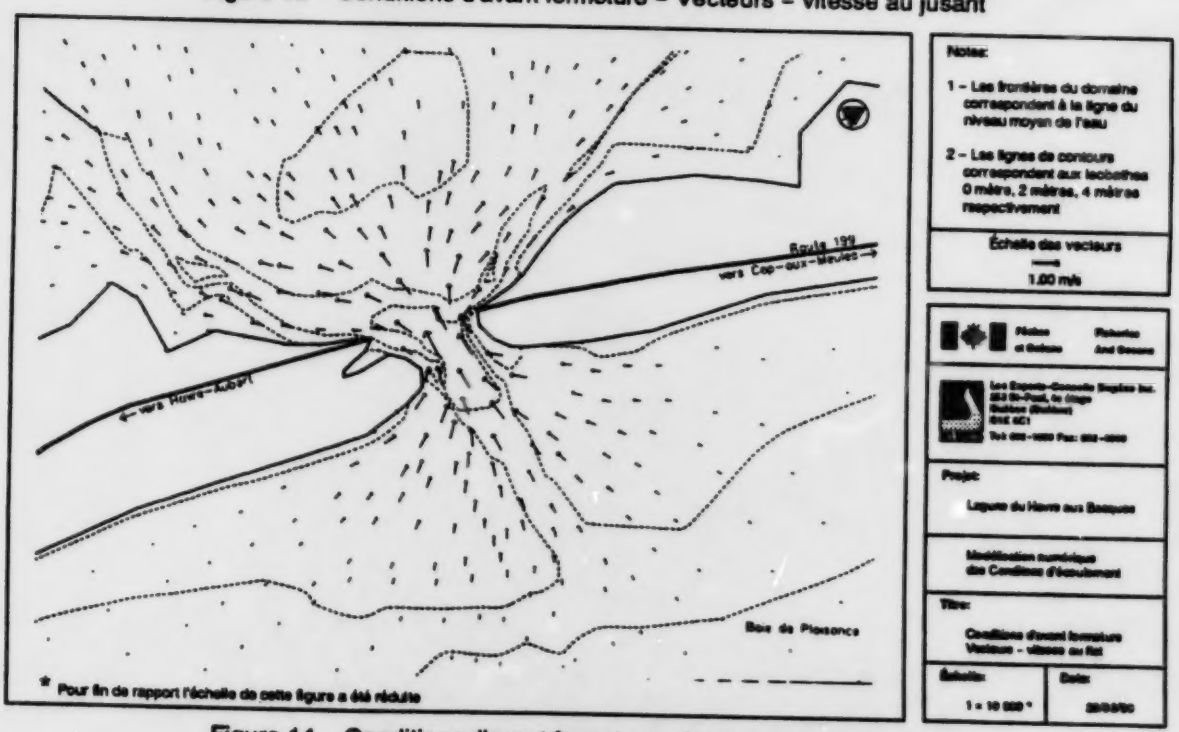


Figure 14 – Conditions d'avant fermeture – Vecteurs – vitesse au flot

Force tractrice (Pa)

0.0	1.0
1.0	1.5
1.5	2.0
2.0	2.5
2.5	3.0
3.0	3.5
3.5	4.0
4.0	

Pêches et Océans Canada
Gestion de l'habitat du poisson

Les Experts-Conseils
SOGECO
Inc

Projet:
Lagune de Havre Aux Basques

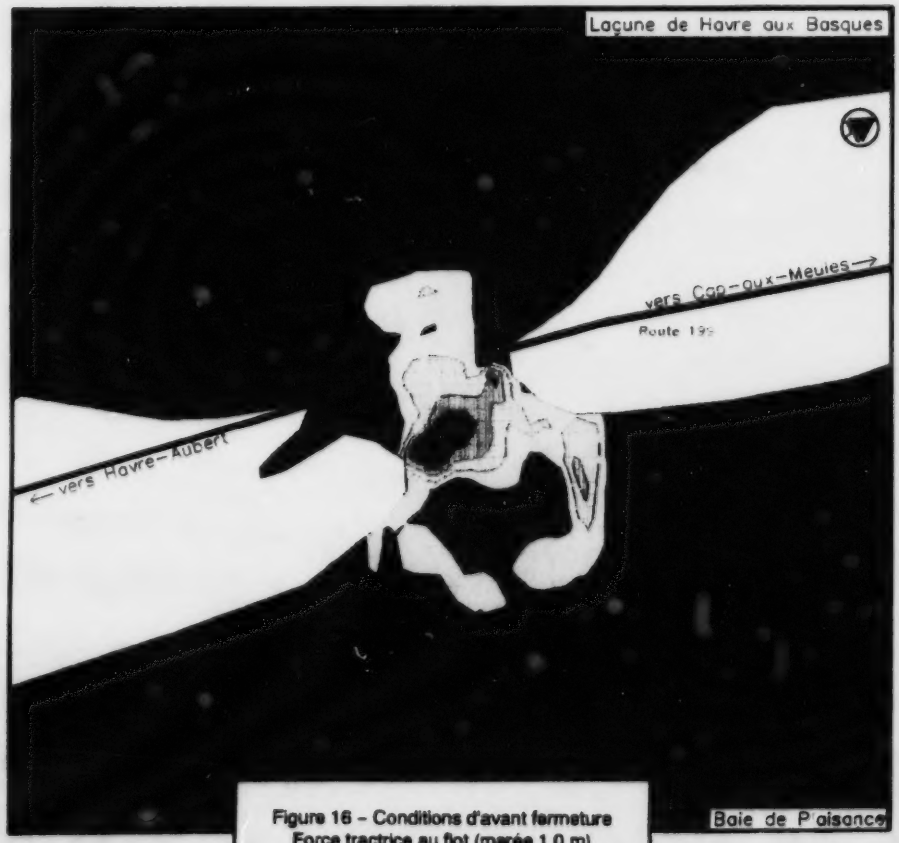
Modélisation Numérique
Des Conditions d'Écoulement

Titre:
Conditions d'avant fermeture
Détail

Échelle: 1:8 000

Date: 1/08/90

Figure 15 – Conditions d'avant fermeture
Force tractrice au jusant (marée 1,0 m)



Force tractrice (Pa)

0.0	1.0
1.0	1.5
1.5	2.0
2.0	2.5
2.5	3.0
3.0	3.5
3.5	4.0
4.0	

Pêches et Océans Canada
Gestion de l'habitat du poisson

Les Experts-Conseils
SOGECO
Inc

Projet:
Lagune de Havre Aux Basques

Modélisation Numérique
Des Conditions d'Écoulement

Titre:
Conditions d'avant fermeture
Détail

Échelle: 1:8 000

Date: 1/08/90

Figure 16 – Conditions d'avant fermeture
Force tractrice au flot (marée 1,0 m)

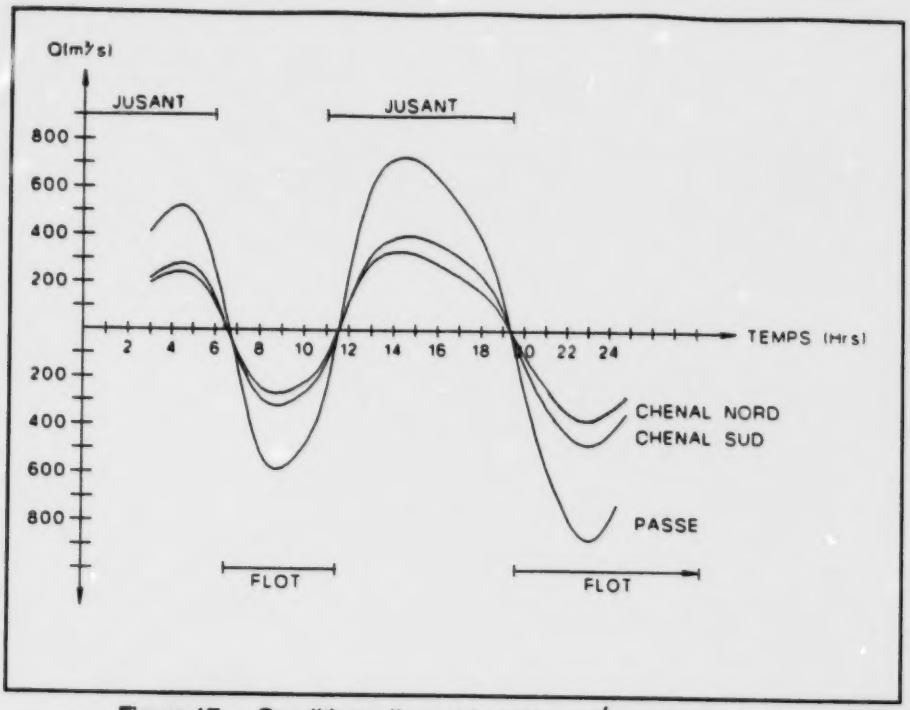


Figure 17 – Conditions d'avant fermeture – Évolution du débit en différentes sections

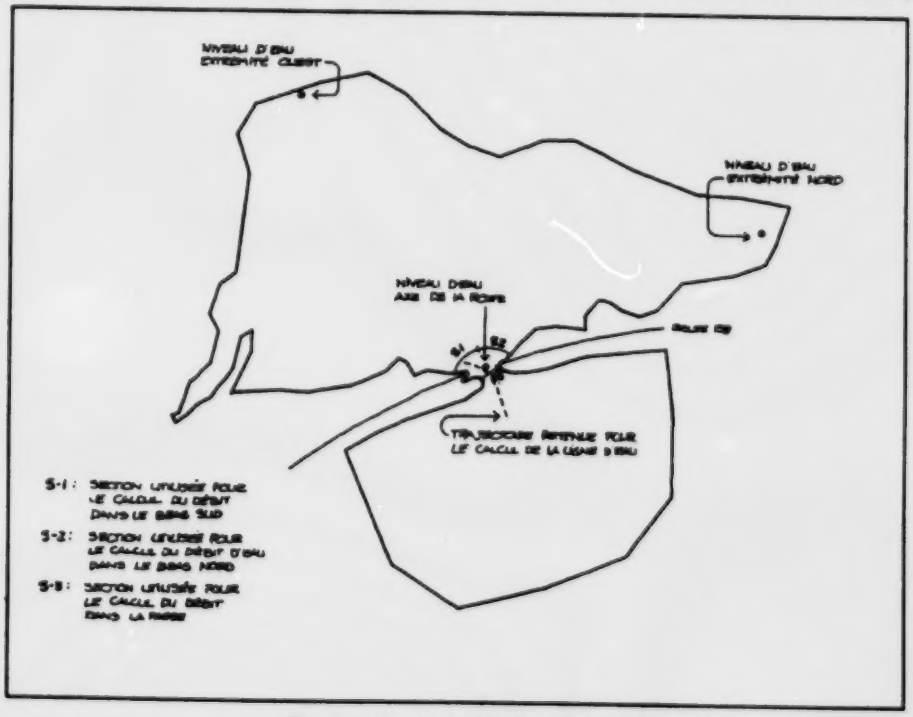
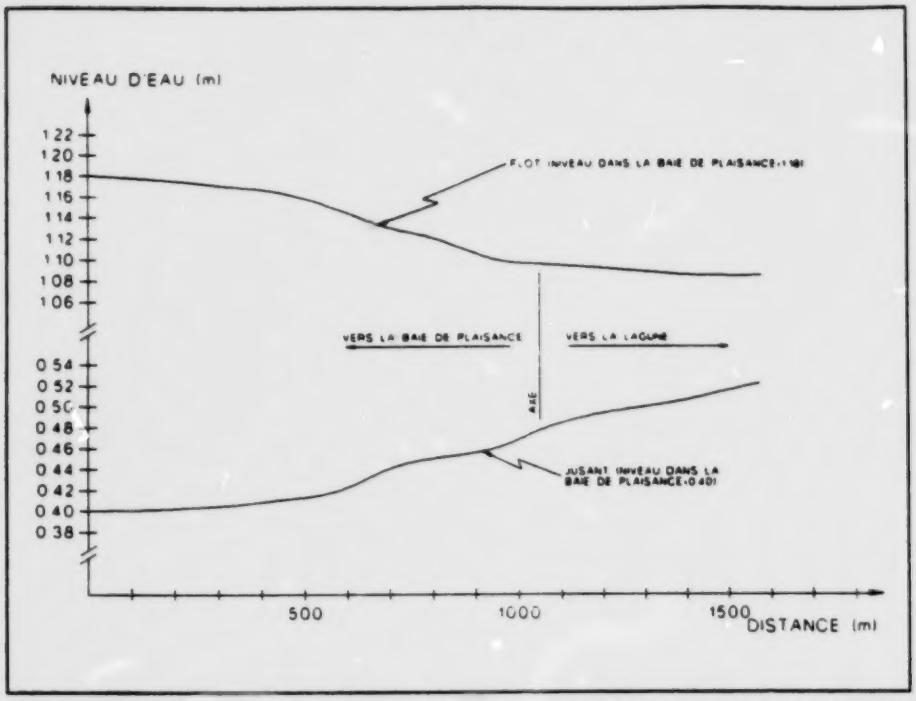


Figure 18 – Localisation des sections de calcul du débit



Notes:

Pêches et Océans / Fisheries and Oceans

Les Experts-Conseils Beglinex Inc.
283 St-Paul, 4e étage
Québec (Québec)
G1K 6C1
Tél: 692-1053 Fax: 692-4646

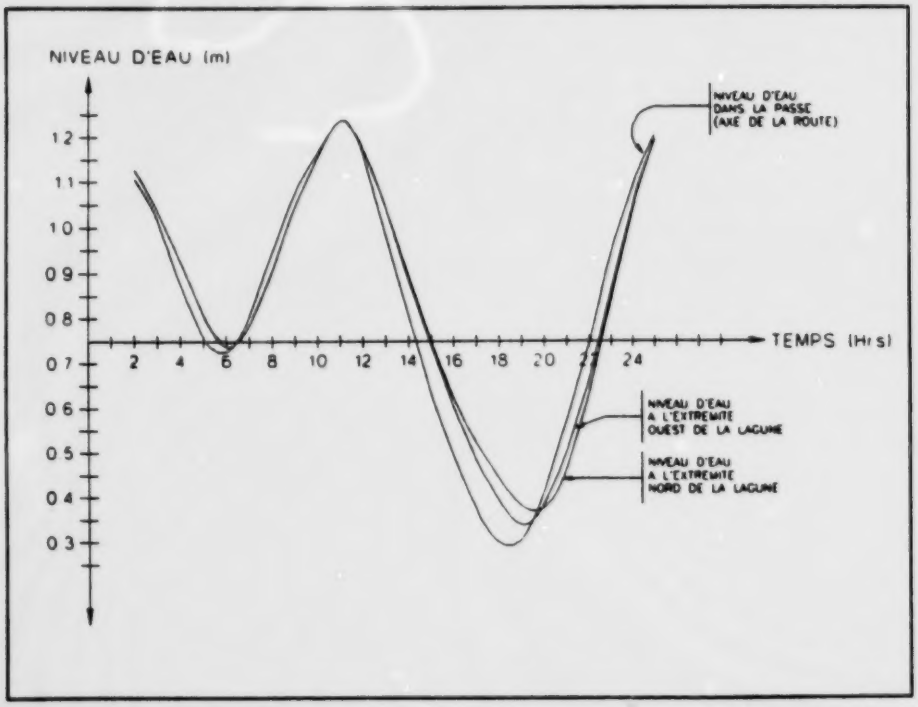
Projet:
Lagune du Havre aux Basques

Modélisation numérique des Conditions d'écoulement

Titre:
Conditions d'avant fermeture
Profils en long dans le chenal du flot et du jusant

Échelle: Date:

Figure 19 – Conditions d'avant fermeture – Profils en long dans le chenal du flot et du jusant



Notes:

Pêches et Océans / Fisheries and Oceans

Les Experts-Conseils Beglinex Inc.
283 St-Paul, 4e étage
Québec (Québec)
G1K 6C1
Tél: 692-1053 Fax: 692-4646

Projet:
Lagune du Havre aux Basques

Modélisation numérique des Conditions d'écoulement

Titre:
Conditions d'avant fermeture
Variation du niveau d'eau dans la passe et dans la lagune

Échelle: Date:

Figure 20 – Conditions d'avant fermeture – Variation du niveau d'eau dans la passe et dans la lagune

CONDITIONS RÉAMÉNAGÉES - SIMULATION DES VARIANTES D'AMÉNAGEMENT

VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 1 (Ouellet et Ropars, 1989)

Nous présentons dans cette section les différents aspects entourant la modélisation de la première variante d'aménagement qui correspond à la solution d'un chenal artificiel présentée dans l'étude hydrosédimentologique (Ouellet et Ropars, 1989) et illustrée à la figure 21.

Description de la variante

La première variante d'aménagement étudiée a été définie par analogie avec la passe naturelle correspondant aux conditions d'avant fermeture. Comme spécifié dans l'étude hydrosédimentologique (Ouellet et Ropars, 1989), le chenal proposé possède une largeur de 200 mètres, une cote de fond à 3,5 mètres sous le zéro marégraphique et une longueur de 500 mètres, mesurée depuis l'axe de la route. Cet axe fait un angle de 77° par rapport à l'axe du chenal (figure 21). La section d'écoulement du chenal est de 850 m^2 pour un niveau moyen de l'eau à 0,75 m au-dessus du niveau marégraphique. Ledit chenal est centré sur l'axe de l'ancien chenal (conditions d'avant 1956) de manière à reconstituer le plus fidèlement possible les conditions hydrodynamiques au voisinage de la passe, plus particulièrement, la contribution respective des deux (2) bras du côté de la lagune.

Modèle géométrique

Le nombre total d'éléments et de noeuds s'établit à 955 et 2018 respectivement. Le détail du maillage au voisinage de la passe est présenté sur la figure 22. Notons que des transitions ont été ajoutées dans les coins de la passe de manière à rendre plus naturels les écoulements dans le chenal. La bathymétrie discrétisée est présentée sur la figure 23. Les différences les plus importantes avec la bathymétrie des conditions d'avant fermeture se situent principalement au voisinage de la passe et dans la passe proprement dite, où une valeur constante de 3,5 mètres a été fixée. Du côté de la baie de Plaisance, on retrouve un profil de rive régulier, toute trace de l'ancienne zone "deltaïque" ayant été éliminée depuis la fermeture de la lagune. Du côté ouest de la route 199, on remarquera certaines différences mineures à l'entrée de la passe par rapport au relevé bathymétrique de 1955.

Simulation

La simulation a été réalisée en utilisant les mêmes coefficients que ceux définis à la section du choix des paramètres d'ajustement et le même signal de marée.

Présentation et analyse des résultats

Les résultats du modèle sont présentés sous la forme d'isovaleurs (force tractrice) et de vecteurs courant. L'examen des résultats fait ressortir les points suivants:

Vitesses d'écoulement. La vitesse moyenne à l'intérieur du chenal est plus grande au flot qu'au jusant (figures 24 et 25). Durant le flot, l'écoulement à l'intérieur du chenal est plutôt uniforme, la valeur maximale se situant à près de 1 m/s (figure 25). L'écoulement est plus fortement chenalisé durant le jusant alors qu'il présente une plus grande uniformité au flot. L'écoulement dans le bras sud du côté de la lagune semble privilégié par rapport à celui dans le bras nord.

Forces tractrices (figures 26 et 27). Les sollicitations les plus importantes se retrouvent dans la passe où des valeurs supérieures à 4 Pa ont été calculées. En se basant sur une force tractrice critique (τ_c) de 2 Pa (Chow, 1959; Morris, 1972) pour le sable de la passe, toutes les zones présentant des valeurs supérieures à 2 Pa présenteraient une certaine mobilité des sédiments de fond.

En période de flot, le chenal de la passe est sollicité uniformément sur presque toute sa longueur. Les zones de contraintes supérieures à 2 Pa sont limitées à la passe et à sa périphérie. Au jusant, la distribution des contraintes est moins uniforme; le chenal de la passe est moins sollicité qu'au flot mais on retrouvera certaines valeurs supérieures à 2 Pa dans les deux bras du côté lagune. Au niveau du pont, il y aura des mouvements de sédiments.

Partage des débits. L'évolution du débit dans les deux bras de la lagune et dans la passe, est illustrée sur la figure 28. Comme il avait été observé pour les conditions d'avant fermeture, la contribution du chenal sud est plus importante que celle du bras nord (environ 10%).

Prisme de marée. Le calcul du prisme de la marée basé sur l'intégration du débit d'eau transité par la passe conduit à une valeur de $14,7 \times 10^6$ m^3.

Lignes d'eau et niveaux d'eau. Les lignes d'eau dans la passe en période de flot et de jusant, sont présentées à la figure 29. La forme des courbes est différente de celle calculée pour les conditions d'avant fermeture, ce qui est tout à fait normal compte tenu des différences appréciables dans la géométrie des deux passes. Les pertes de charge, pour les deux cas, demeurent cependant comparables et s'établissent à 11 cm au jusant et au flot.

Par ailleurs les marégrammes calculés en trois (3) points du domaine (figure 30) présentent les caractéristiques résumées dans le tableau 2.

Comparaison avec les conditions d'avant fermeture

Caractéristiques hydrauliques. Le réaménagement de la passe selon la variante proposée a pour conséquence une restructuration des écoulements dans son voisinage. En ce qui a trait aux vitesses, les différences les plus importantes se retrouvent du côté est de la route où la géométrie du domaine est passablement différente suite à l'ensablement de la plage et à la définition du chenal artificiel. Du côté ouest de la route, les conditions d'approche sont à peu près équivalentes à celles des conditions d'avant fermeture. Dans chacun des cas, on retrouve des vitesses maximales au flot voisines de 1 m/s. Dans le cas des conditions réaménagées, on retrouve un écoulement plutôt uniforme dans le chenal. Ce dernier aspect est lié à la géométrie régulière du chenal et à une profondeur d'eau presque constante.

Le partage du débit entre les deux bras du côté de la lagune s'effectue sensiblement de la même façon dans les deux cas. Cet aspect semble confirmer le choix de l'angle du chenal par rapport à l'axe de la route (77°). Concernant les niveaux d'eau, les différences les plus sensibles surviennent dans la passe alors que des valeurs quasi-identiques sont observées aux points situés aux extrémités du domaine.

Dans les deux cas, les forces tractrices maximales dans le chenal s'établissent à près de 6 Pa. Dans le cas de la variante proposée, l'étendue de la zone présentant des valeurs supérieures à 4 Pa est plus importante compte tenu que la contraction dans l'écoulement associée à la passe s'exerce sur une plus grande longueur.

Stabilité. Dans les deux cas étudiés, on retrouve des zones présentant une certaine mobilité des sédiments, lorsque l'on considère une force tractrice d'arrachement de 2 Pa pour le sable de la passe. Les conditions de stabilité sont comparables dans les deux cas, ce qui est en partie lié au choix de la section d'écoulement du chenal proposé qui présente une surface mouillée, au niveau moyen de l'eau, de 850 m^2 comparativement à 900 m^2 pour les conditions d'avant fermeture (section la plus étroite de la passe).

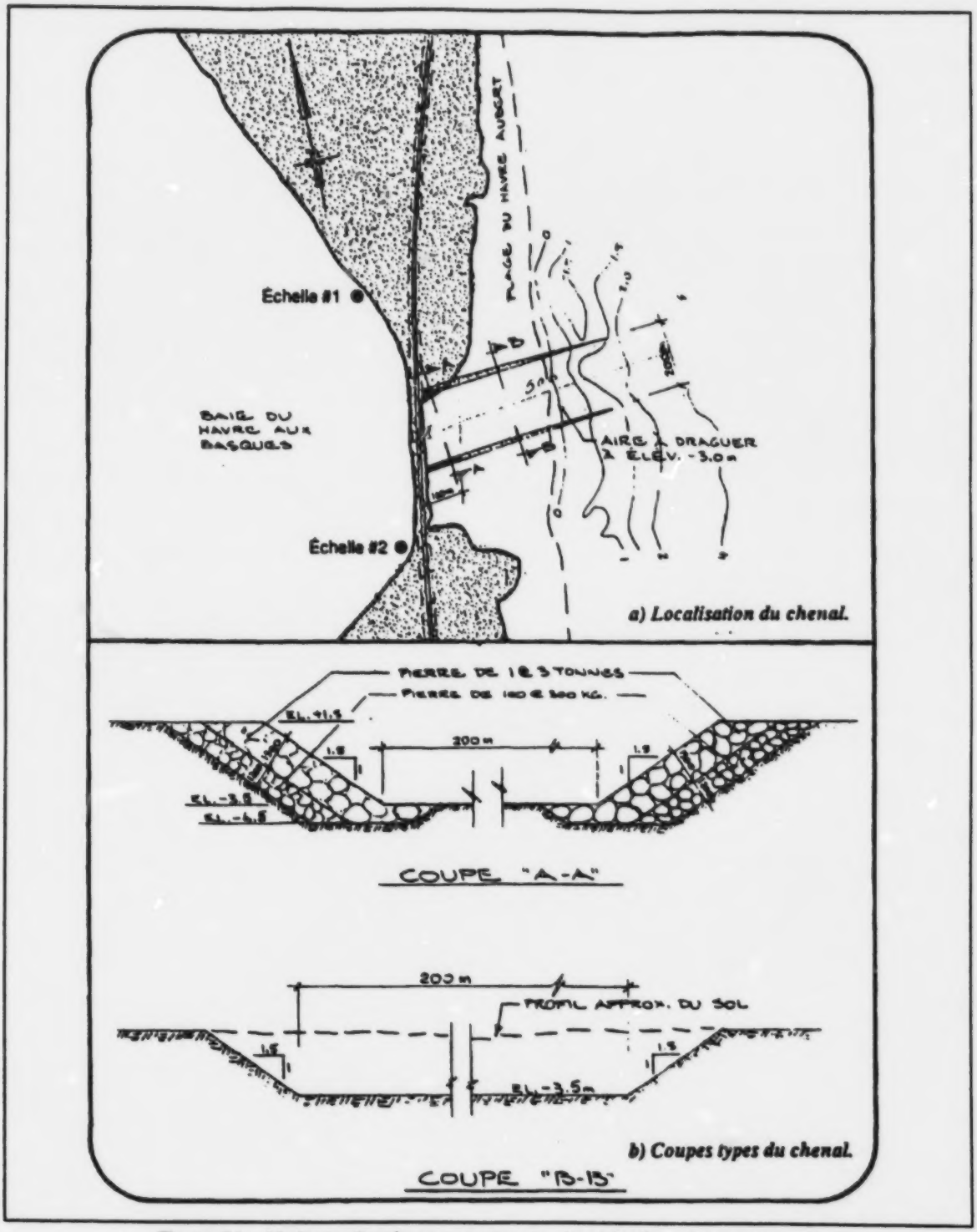


Figure 21 – Variante d'aménagement no 1 – Localisation et coupes types

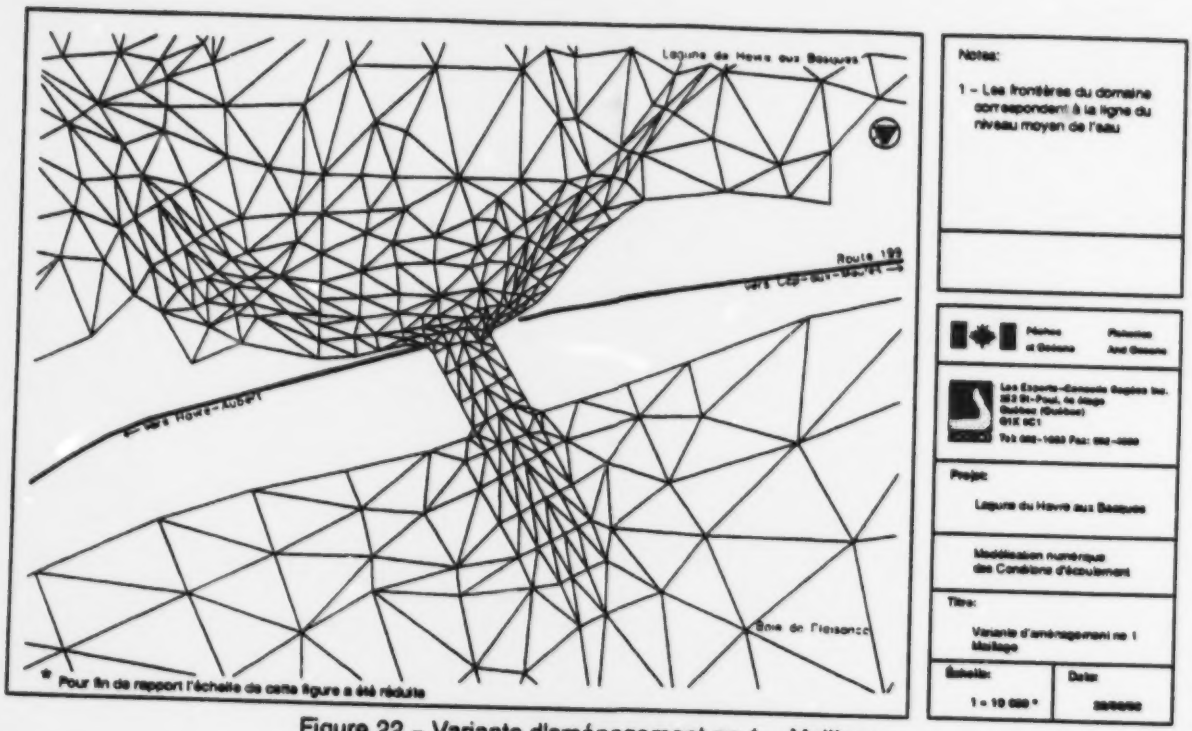


Figure 22 – Variante d'aménagement no 1 – Maillage

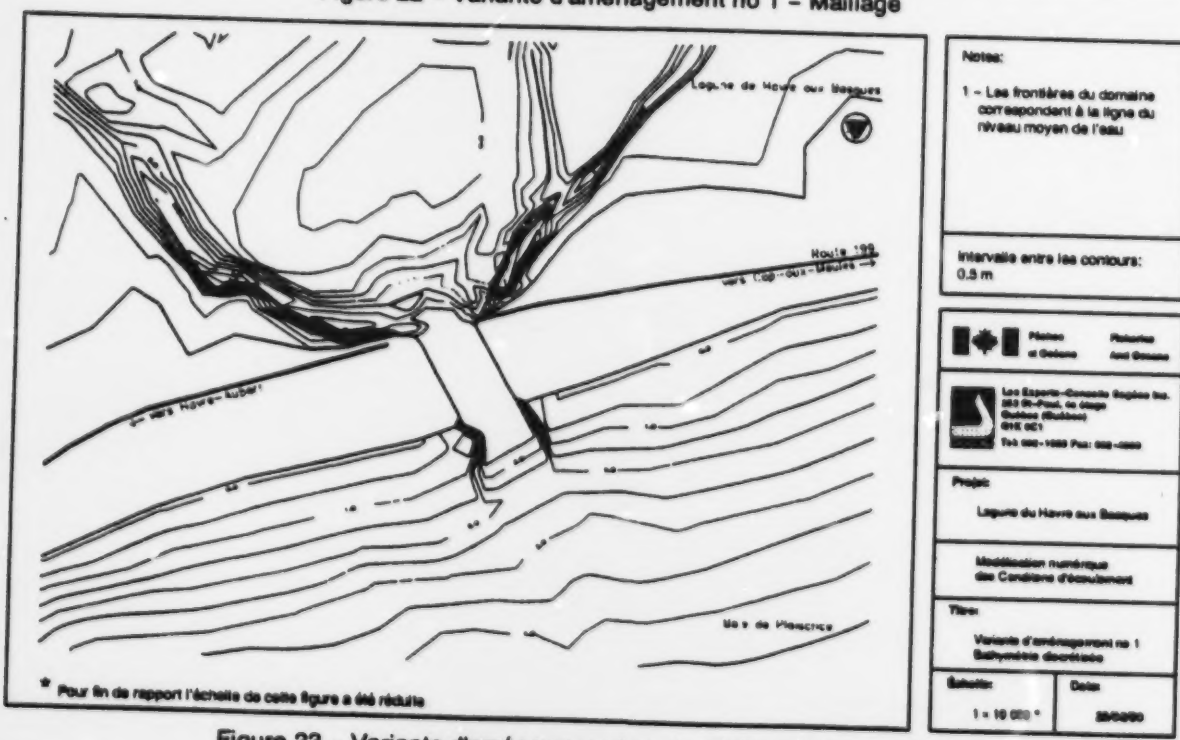


Figure 23 – Variante d'aménagement no 1 – Bathymétrie discrétisée

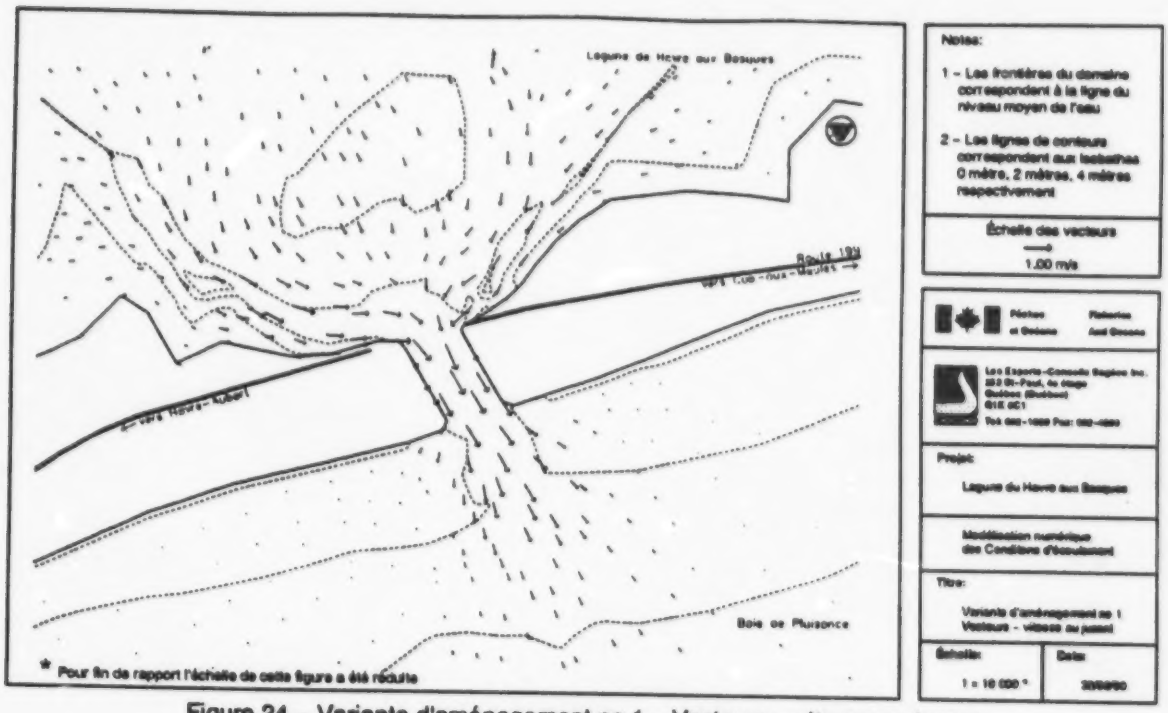


Figure 24 – Variante d'aménagement no 1 – Vecteurs – vitesse au jusant

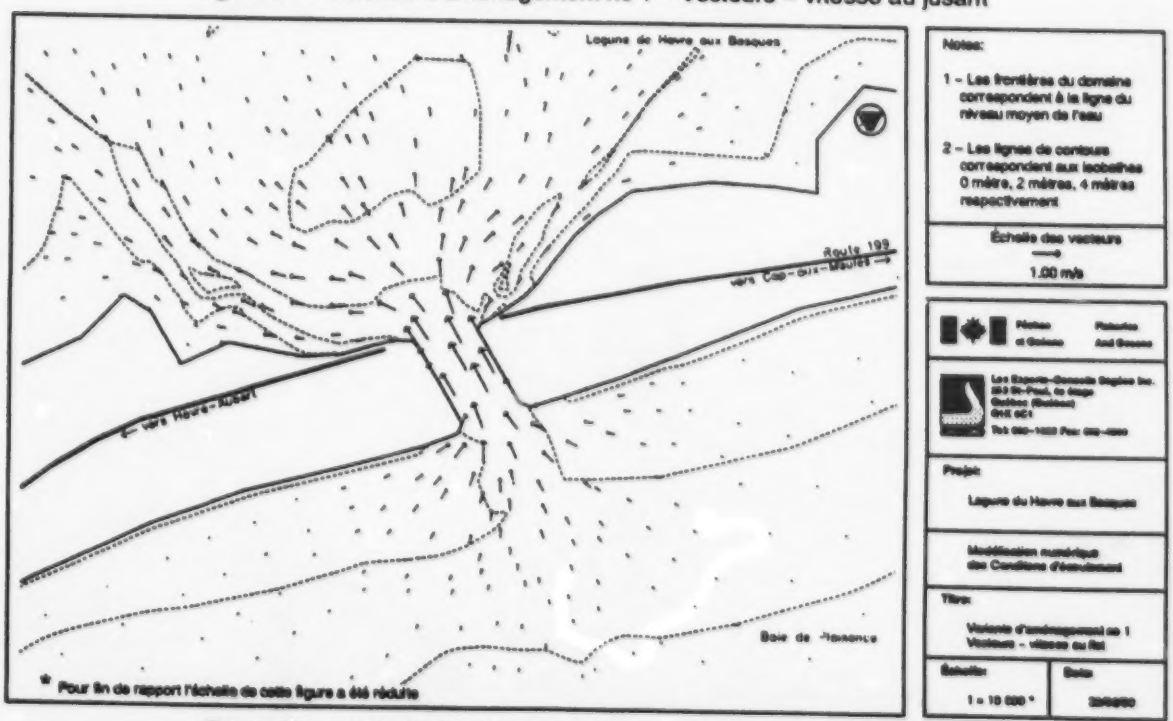


Figure 25 – Variante d'aménagement no 1 – Vecteurs – vitesse au flot

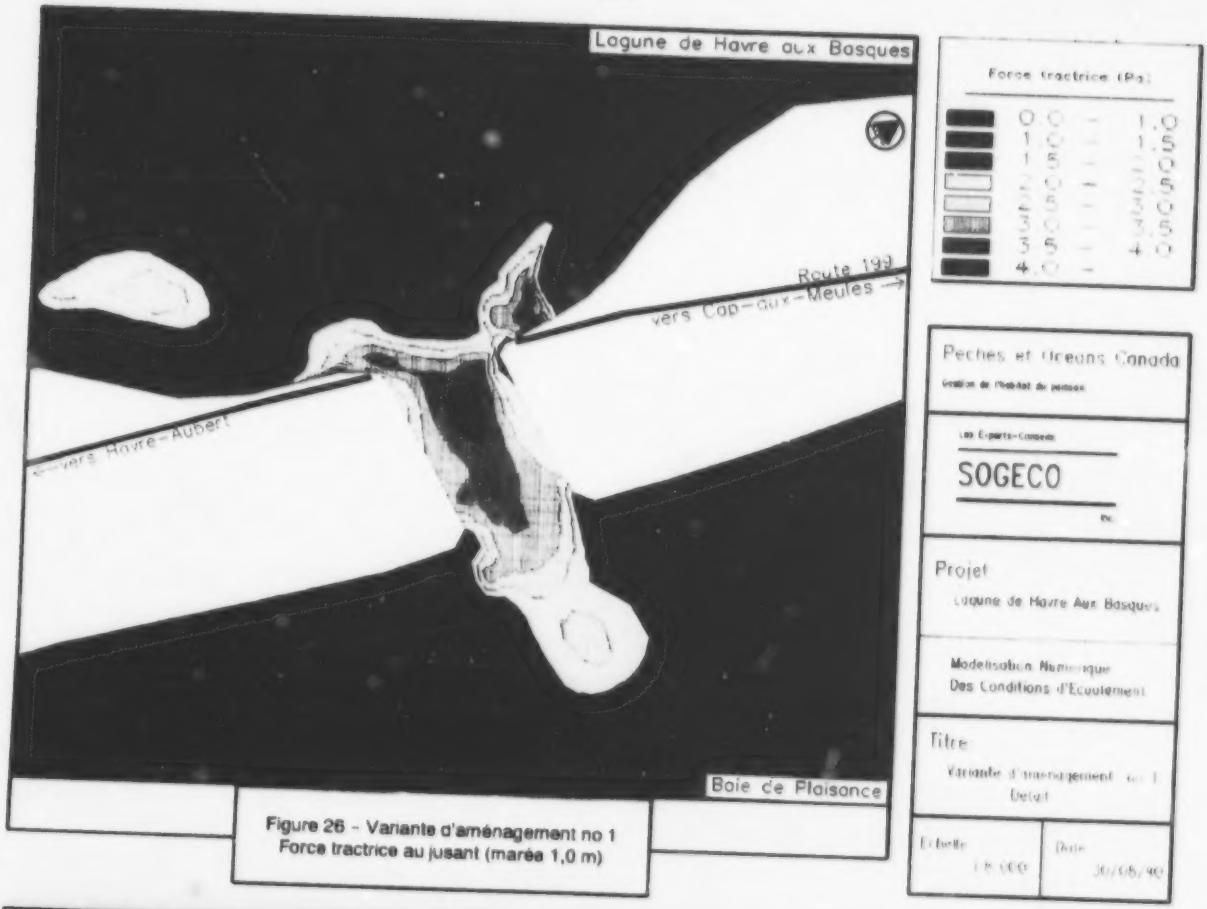


Figure 26 - Variante d'aménagement no 1
Force tractrice au jusant (marée 1,0 m)

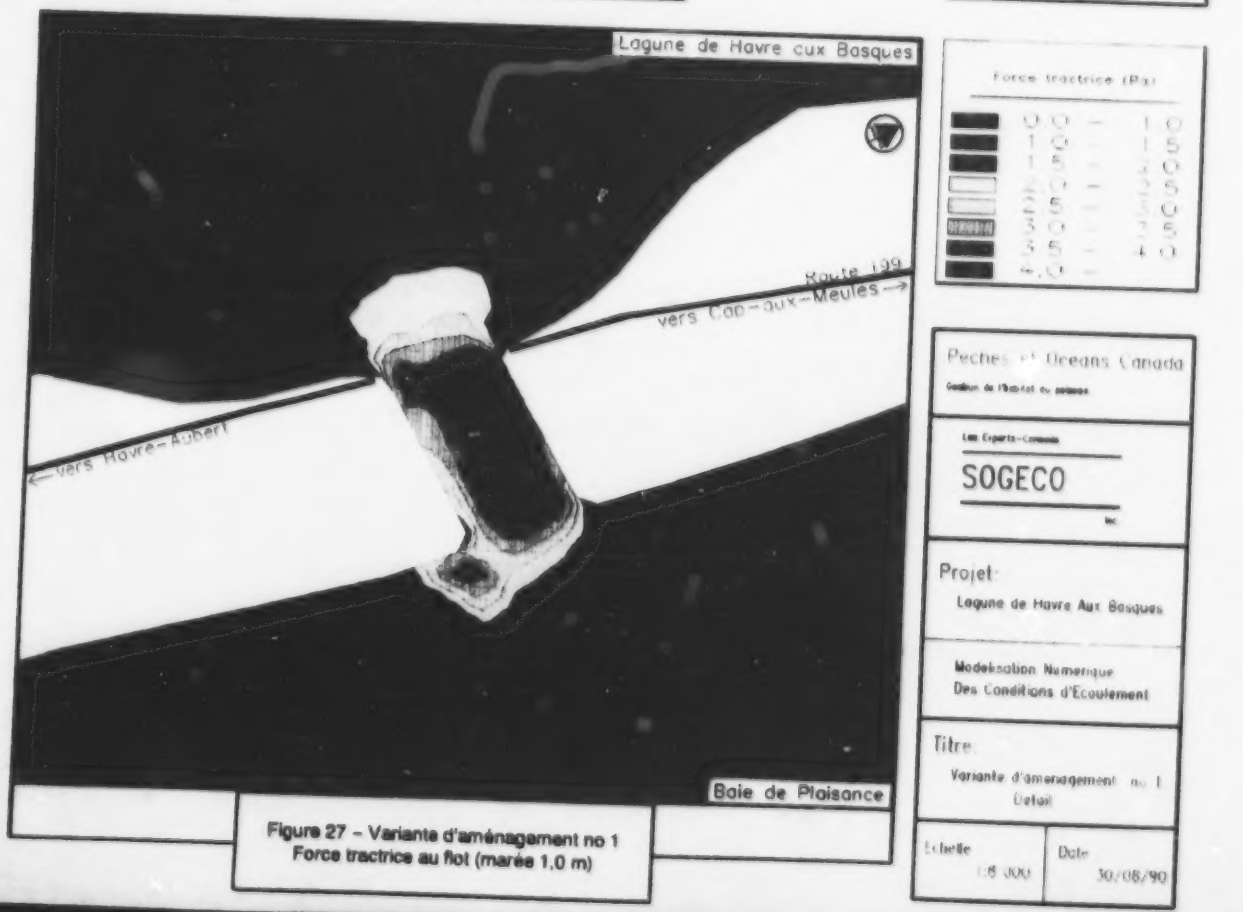


Figure 27 - Variante d'aménagement no 1
Force tractrice au flot (marée 1,0 m)

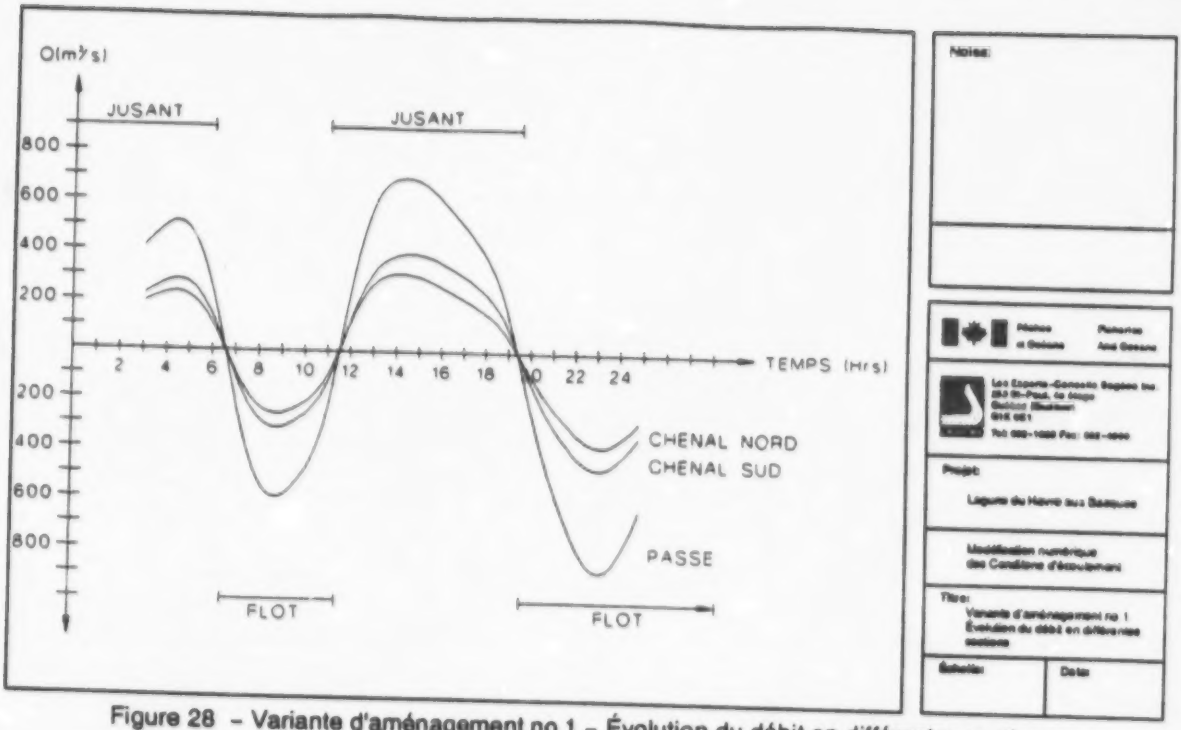


Figure 28 – Variante d'aménagement no 1 – Évolution du débit en différentes sections

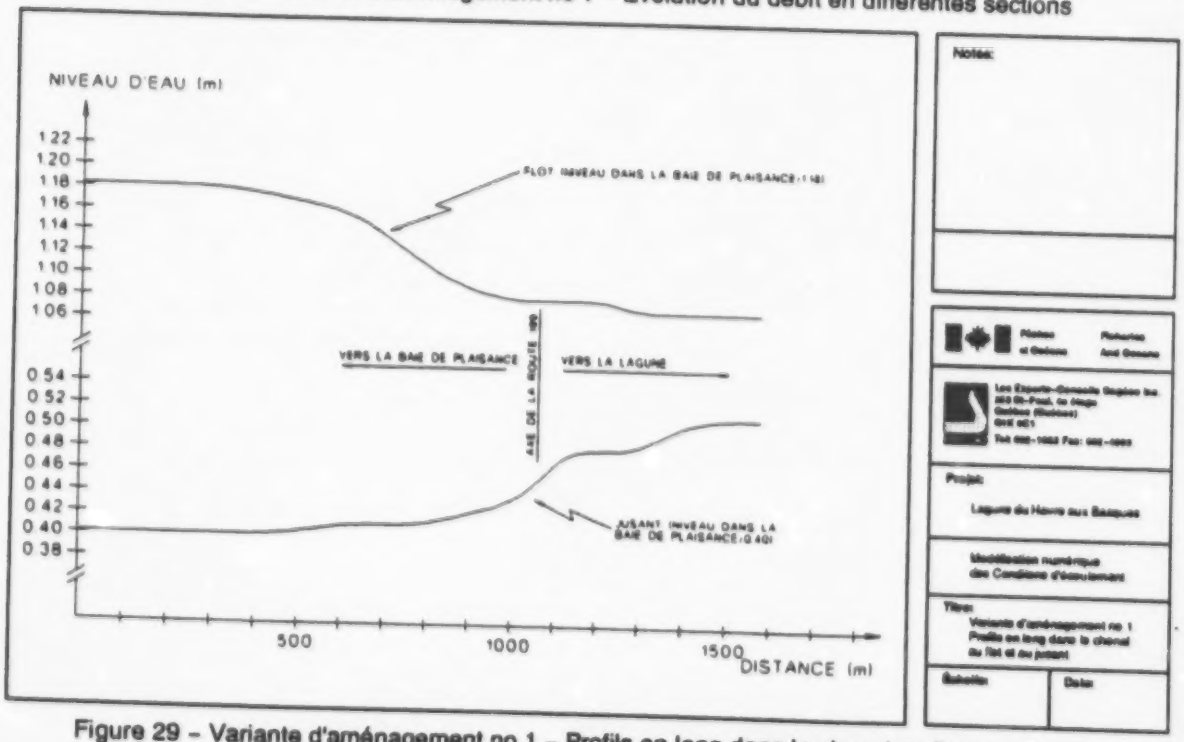


Figure 29 – Variante d'aménagement no 1 – Profils en long dans le chenal au flot et au jusant

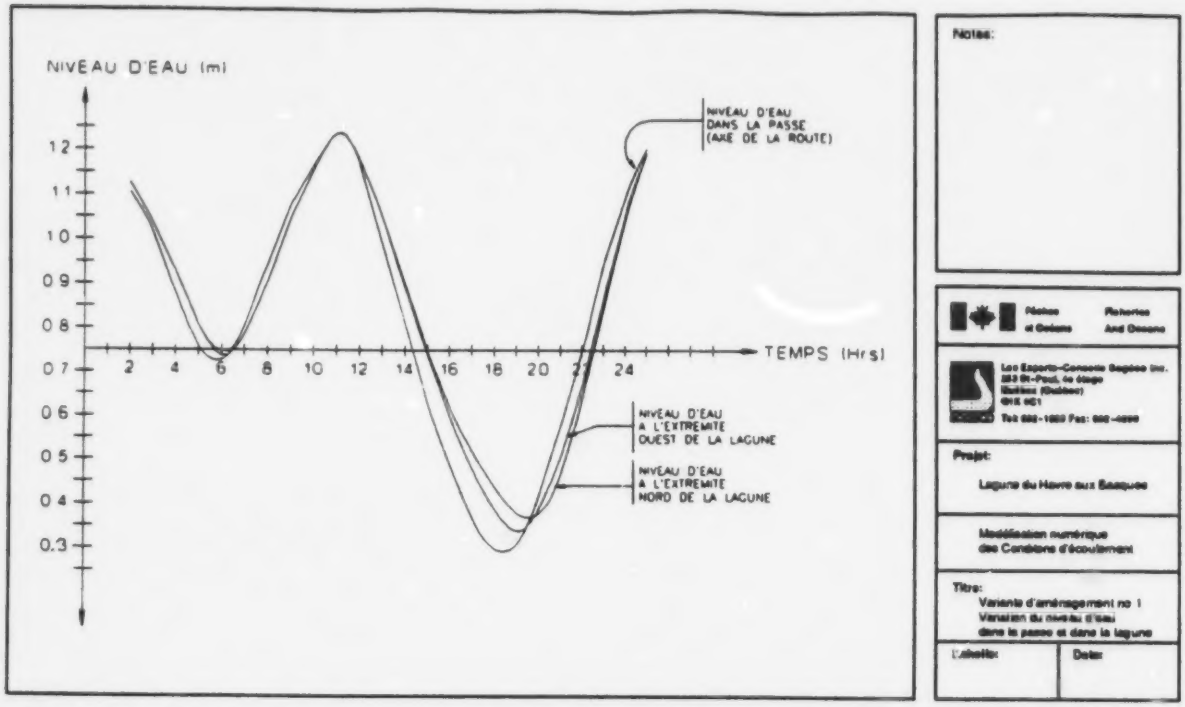


Figure 30 – Variante d'aménagement no 1 – Variation du niveau d'eau dans la passe et dans la lagune

Tableau 2 Variante no 1 : caractéristiques de la marée en trois points du domaine

Position du point dans le domaine modélisé	Marnage (m)	*Déphasage approximatif par rapport à la baie de Plaisance (heure)
Axe de la route	0,95	0,5
Extrémité nord	0,85	2,0
Extrémité Ouest	0,89	1,5

* Ces valeurs correspondent à des points situés aux limites du modèle (figure 19) et non aux extrémités réelles de la lagune. Ainsi, le point à l'extrémité nord du modèle est situé à environ 3 km plus au sud que l'extrémité réelle de la lagune, correspondant aux zones de prés salés. Ces différences entre les limites du domaine discret et naturel qui avaient été justifiées pour établir la schématisation des volumes, doivent être gardées à l'esprit lors de l'examen des déphasages.

Afin d'améliorer les conditions de stabilité des sédiments dans la passe, la section d'écoulement doit être augmentée. Une augmentation de la section au droit du pont permettrait d'abaisser les forces tractrices et de diminuer la mobilité des sédiments de fond.

VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 2

Description de la variante

Cette variante qui a été élaborée pour diminuer les forces tractrices au droit du futur pont, est illustrée sur la figure 31. La géométrie du chenal présente des caractéristiques similaires à celles préconisées pour la première variante. Ainsi la largeur du chenal a été conservée à 200 m et l'angle inscrit par l'axe de chenal par rapport à la route 199, a été conservé à 77°.

Les principales modifications qui furent apportées concernent la bathymétrie dans le chenal et dans les zones d'approche est et ouest ainsi que le profilage des berges à l'entrée du chenal du côté de la lagune.

Bathymétrie. En ce qui concerne la bathymétrie, les modifications concernent surtout les cotes de chaque côté de l'axe de la route 199. Les élévations du fond ont été fixées à -5,5 m sur une surface approximative de 45 000 m^2. Cette cote de -5,5 m s'établit sur une largeur de 180 m jusqu'à une distance de 125 m à l'est de l'axe de la route. Des transitions sur 80 m permettent un rétrécissement de ce plateau à -5,5 m qui, plus vers l'est, se retrouve centré dans le chenal sur une largeur de 20 m. De chaque côté de cette chenalisation au centre, des plateaux à -3,5 m ont été placés. Des talus d'une largeur de 10 m atténuent les cassures près des berges et aux lignes d'intersection entre les différents plateaux. Du côté de la lagune, la zone de -5,5 m a été prolongée jusqu'à une distance de $\pm$ 60 m par rapport à l'axe de la route. Le dragage des bras nord et sud à -3,5 m a été prévu pour faciliter l'orientation des courants vers l'entrée de la passe. Les critères qui ont servi pour définir la nouvelle bathymétrie sont les suivants:

- la stabilité du chenal au voisinage de la route;
- les aspects hydrauliques (courants, propagation de la marée);
- la quantité de matériaux à draguer;
- la protection et pentes des berges;
- le profilage des berges;
- la géométrie des extrémités.

Afin de minimiser la portée du futur pont, une révision du profil des berges au voisinage de la route a été réalisée. La géométrie des coins a été arrondie et reprofilée de manière à restreindre la portée totale du pont à 225 m. Comme nous le verrons plus loin, le niveau de discrétisation dans cette zone a été augmenté.

Modèle géométrique

L'implantation de la nouvelle variante a été réalisée en greffant au maillage de base le maillage local correspondant à la nouvelle variante d'aménagement.

La figure 32 illustre le maillage de la variante no 2. Une quantité substantielle d'éléments a été ajoutée au voisinage de l'entrée de la passe afin d'établir une représentation fidèle de la nouvelle géométrie et de la bathymétrie. Le nombre total d'éléments est de 1 239 alors que le nombre de noeuds s'établit à 2 602.

La figure 33 illustre la bathymétrie discrétisée utilisée lors des calculs numériques. On retrouve une excellente correspondance avec le plan de la figure 1 alors que les différentes structures bathymétriques sont très bien définies.

Présentation et analyse des résultats

À l'extérieur de la passe et de ses entrées, les résultats sont très peu différents de ceux de la variante no 1.

Vitesses d'écoulement. L'examen des figures 34 et 35 met en évidence les points suivants.

La nouvelle bathymétrie atténue sensiblement l'intensité des courants, plus particulièrement à l'extrémité ouest de la passe, du côté de la lagune. Ainsi au niveau du plateau à -5,5 m, les vitesses se situent à environ 0,6 m/s ce qui représente une diminution approximative de 30% par rapport à la variante no 1. Au voisinage des coins à l'entrée de la passe (côté lagune), les vitesses de jusant se situent à près de 40 cm/s. L'ajout des plateaux à -3,5 m dans la continuité des bras sud et nord, semble favoriser le ralentissement des courants.

À l'intérieur du chenal, le profil transversal est plus accentué que celui de la variante no 1, ce qui s'explique par la nouvelle bathymétrie qui favorise l'écoulement au centre du chenal. Du côté de la baie de Plaisance, les vitesses au flot s'accélèrent près des coins à l'entrée du chenal.

Forces tractrices (figures 36 et 37). La zone la plus fortement sollicitée se retrouve dans la portion est du chenal, du côté de la baie de Plaisance.

À une distance de 80 m de l'emplacement du futur pont, la force tractrice est limitée à 2,5 Pa à l'exception des talus d'enrochement où on retrouve des valeurs supérieures à 4 Pa. Ce dernier aspect est relié à une valeur plus importante de "n" dans l'expression de la force tractrice.

Les conditions de flot semblent être plus sévères que celles de jusant. Aux coins du chenal situés du côté de la baie de Plaisance, des valeurs supérieures à 4 Pa sont calculées durant le flot, ce qui laisse présager une modification de la géométrie de ce côté de la passe.

Partage des débits. L'évolution du débit aux trois sections localisées à la figure 18 est illustrée sur la figure 38. Les courbes obtenues présentent très peu de différences avec celles calculées pour la variante no 1. Le partage des débits s'effectue de façon similaire dans les deux cas.

Prisme de marée. Une valeur de 14,9 x 10^6 m^3 est obtenue pour le prisme de marée, ce qui constitue une légère augmentation par rapport à la variante no 1. Ce dernier point peut s'expliquer par un meilleur transfert des écoulements associé à la passe d'entrée définie par la variante no 2.

Lignes d'eau et niveaux d'eau. Les lignes d'eau dans la passe calculées au jusant et au flot sont tracées sur la figure 39. Les pertes de charge entre les points extrêmes de la trajectoire de calcul s'établissent à 9 cm au flot et à 10 cm au jusant.

Les marégrammes calculés aux trois points (tableau 3) de références définies antérieurement, sont illustrés sur la figure 40. Les courbes sont semblables à celles calculées pour la variante no 1.

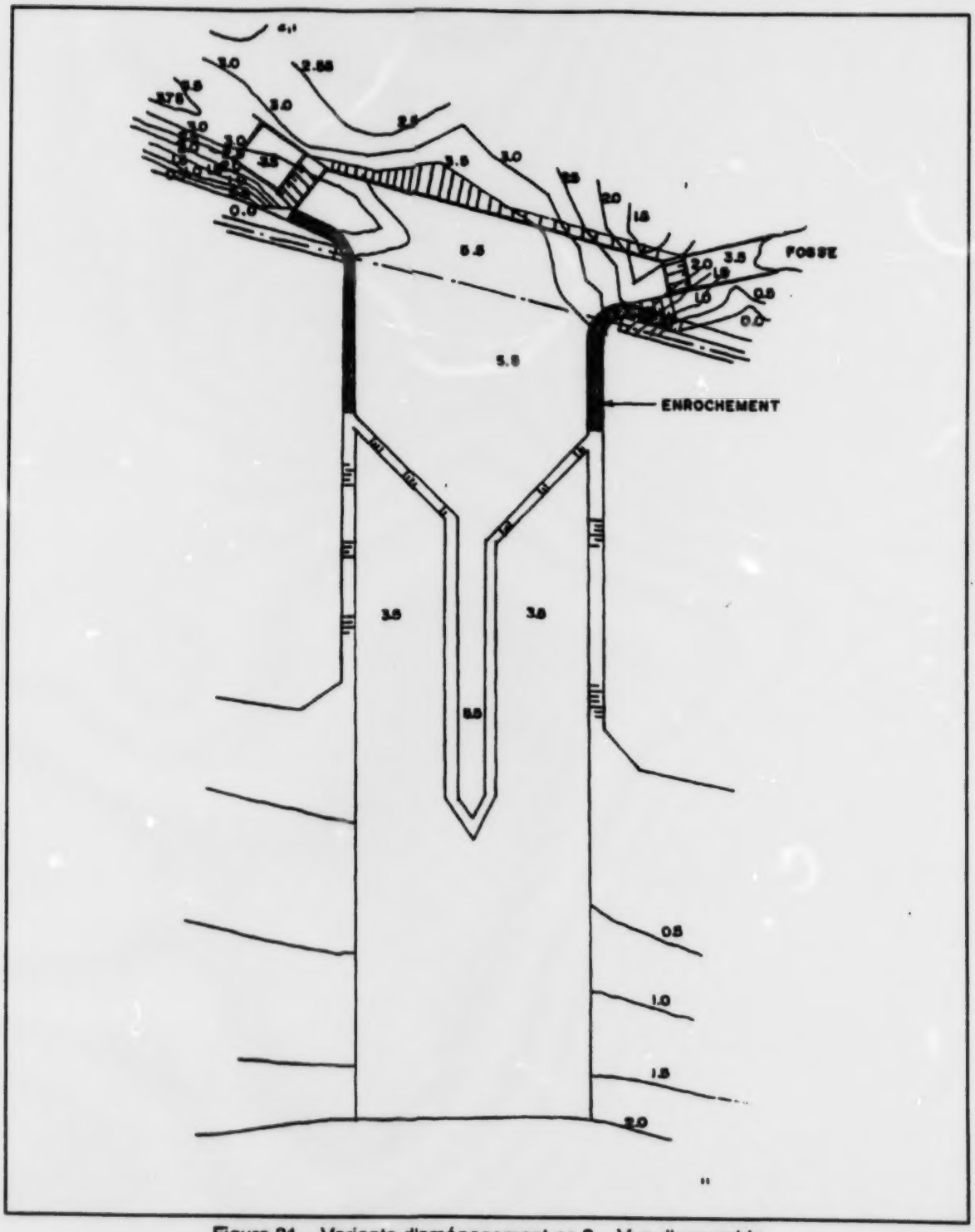


Figure 31 – Variante d'aménagement no 2 – Vue d'ensemble

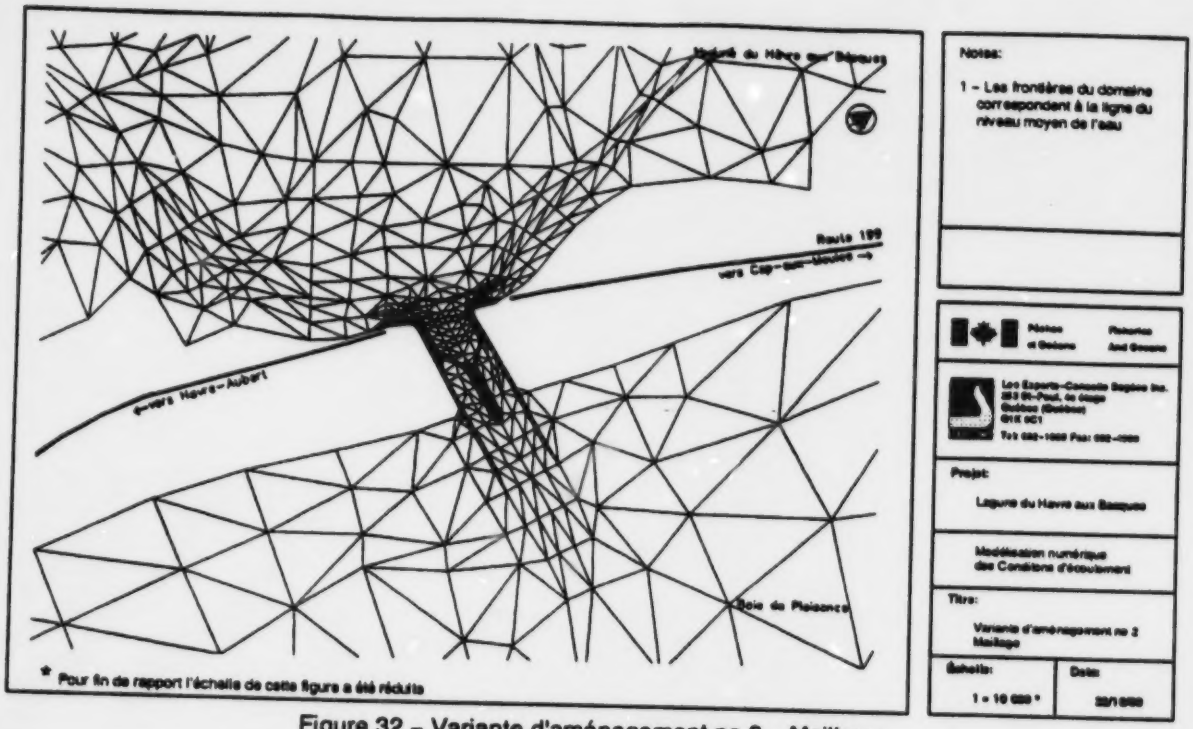


Figure 32 – Variante d'aménagement no 2 – Maillage

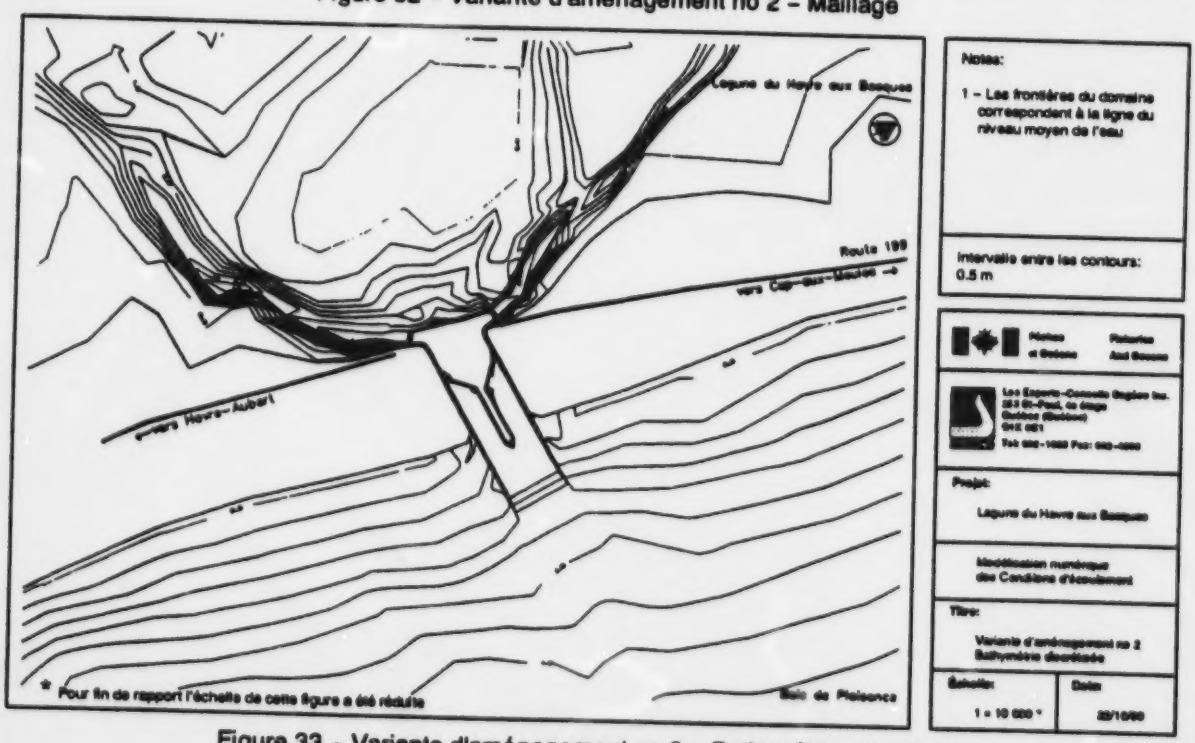


Figure 33 – Variante d'aménagement no 2 – Bathymétrie discrétisée

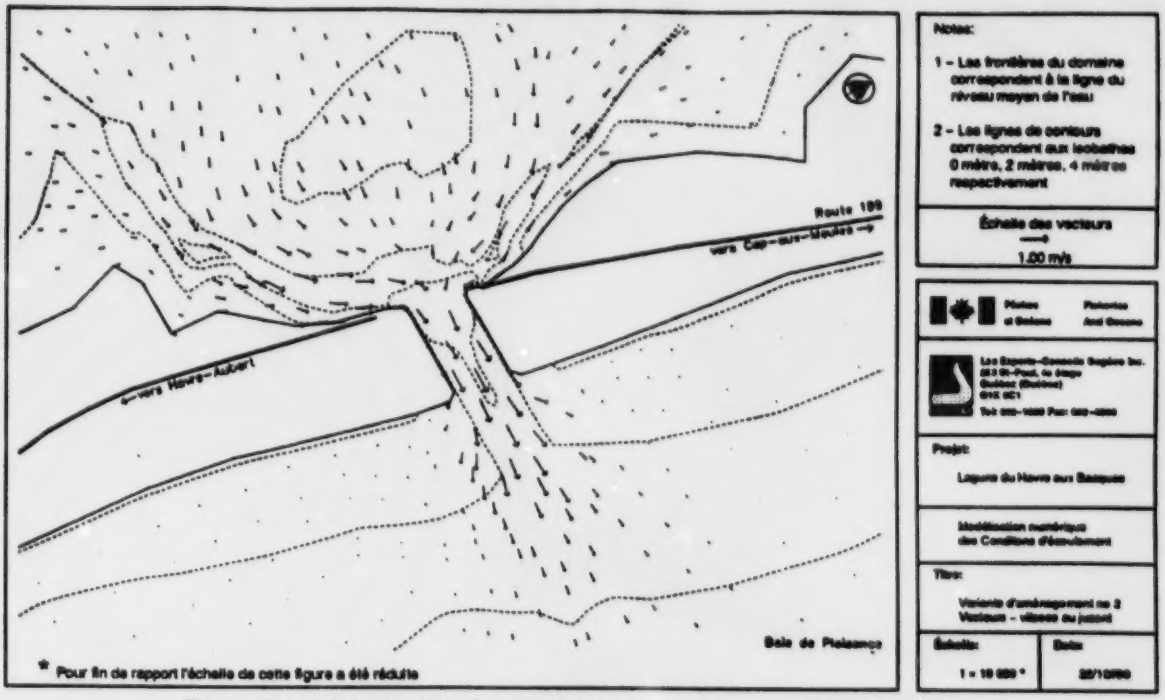


Figure 34 – Variante d'aménagement no 2 – Vecteurs – vitesse au jusant

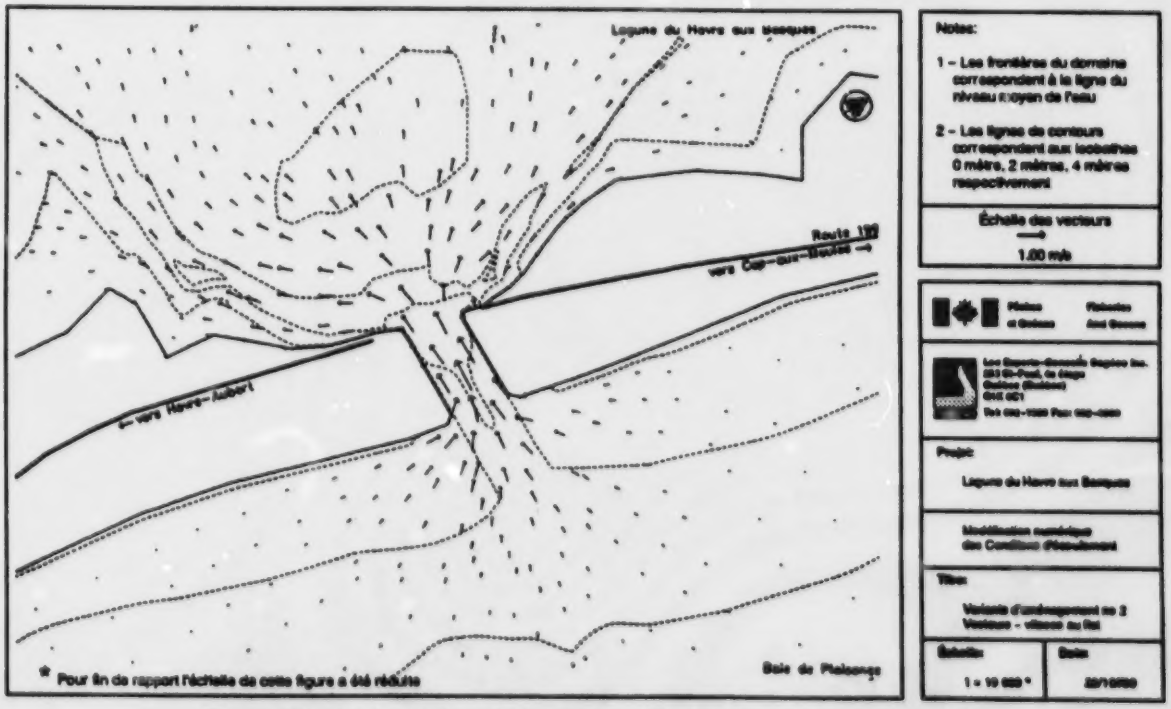


Figure 35 – Variante d'aménagement no 2 – Vecteurs – vitesse au flot

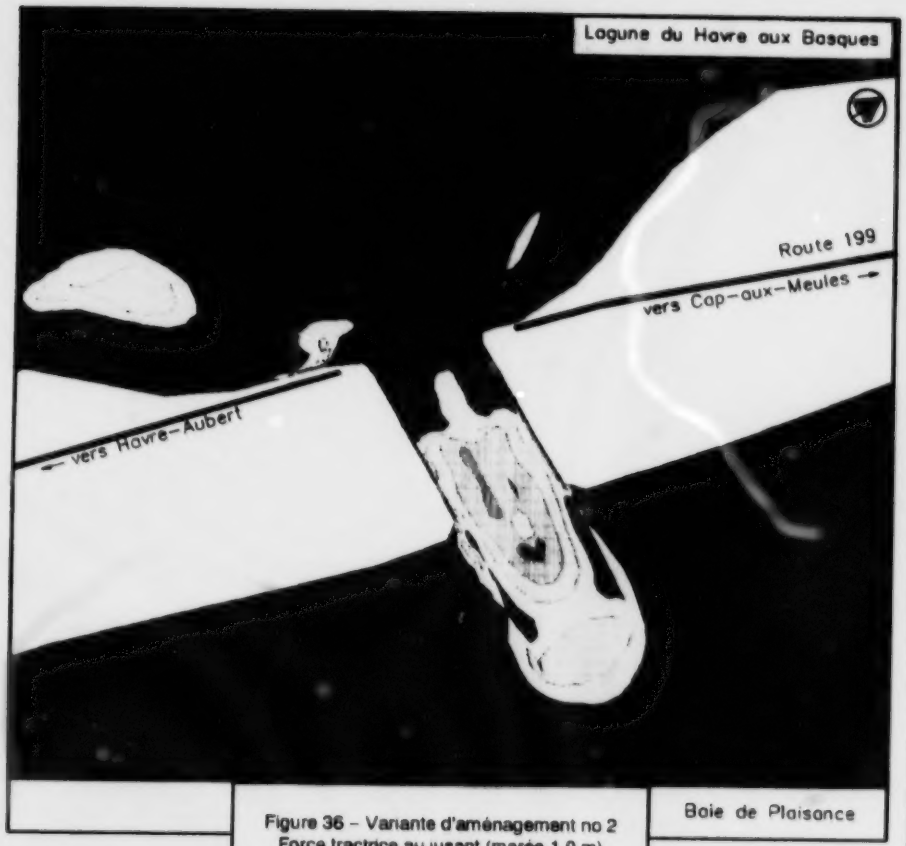


Figure 36 – Variante d'aménagement no 2
Force tractrice au jusant (marée 1,0 m)

Force tractrice (Pa)

0,0 – 1,0
1,0 – 1,5
1,5 – 2,0
2,0 – 2,5
2,5 – 3,0
3,0 – 3,5
3,5 – 4,0
4,0 –

Pêches et Océans Canada
Gestion de l'habitat du poisson

Les Experts-Conseils
Sogeco
inc.

Projet
Lagune de Havre Aux Basques

Modélisation Numérique
Des Conditions d'Écoulement

Titre
Variante d'aménagement no 2
Détail

Échelle 1:8 000 | Date 22/10/90

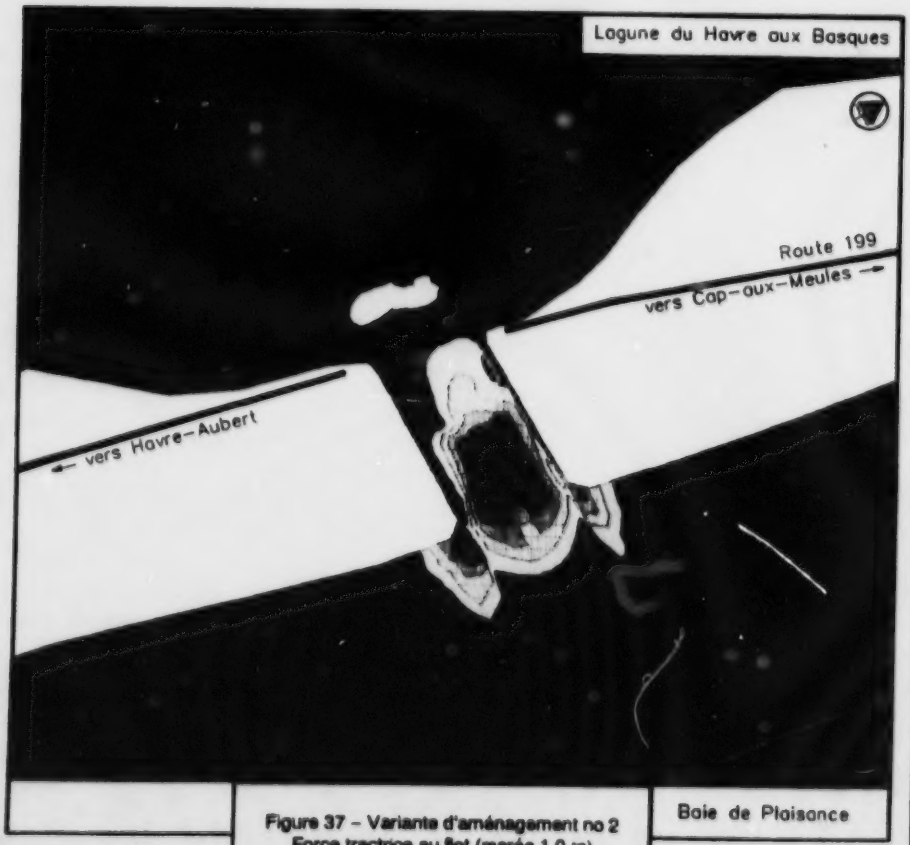


Figure 37 – Variante d'aménagement no 2
Force tractrice au flot (marée 1,0 m)

Force tractrice (Pa)

0,0 – 1,0
1,0 – 1,5
1,5 – 2,0
2,0 – 2,5
2,5 – 3,0
3,0 – 3,5
3,5 – 4,0
4,0 –

Pêches et Océans Canada
Gestion de l'habitat du poisson

Les Experts-Conseils
Sogeco
inc.

Projet
Lagune de Havre Aux Basques

Modélisation Numérique
Des Conditions d'Écoulement

Titre
Variante d'aménagement no 2
Détail

Échelle 1:8 000 | Date 22/10/90

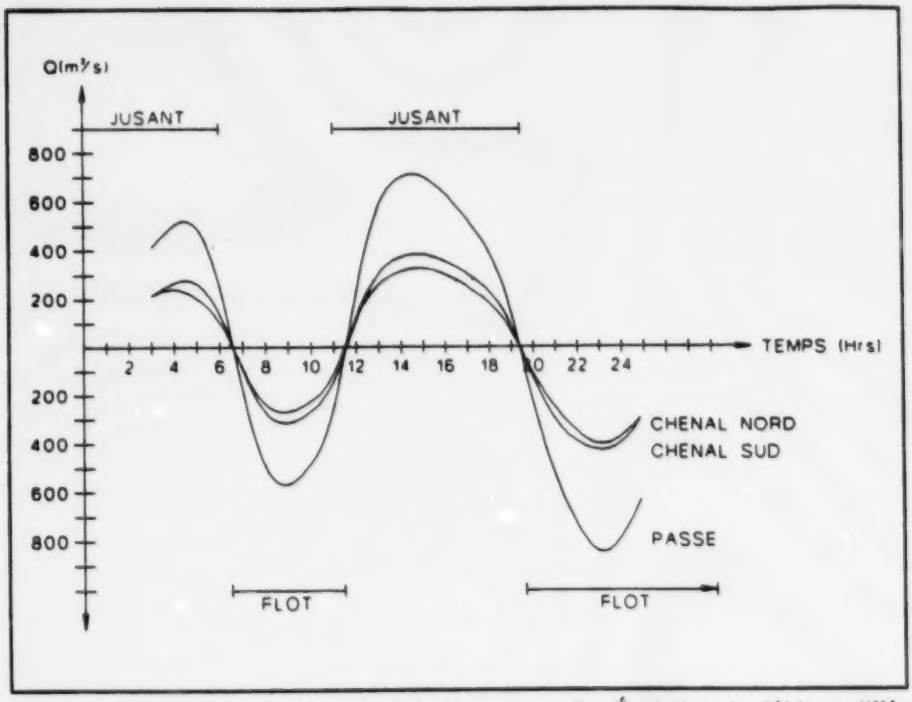


Figure 38 – Variante d'aménagement no 2 – Évolution du débit en différentes sections

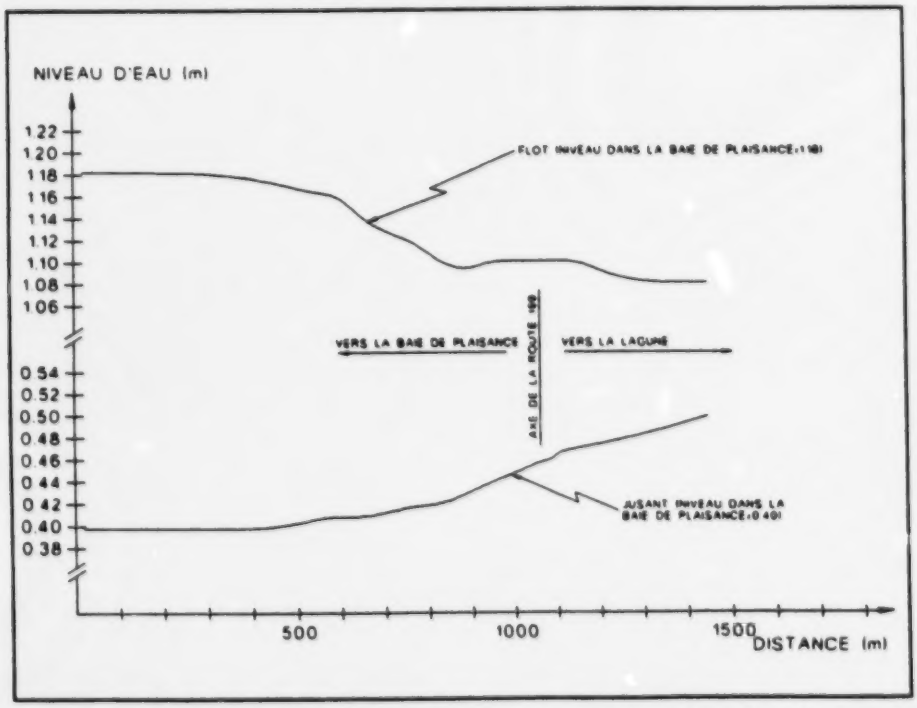


Figure 39 – Variante d'aménagement no 2 – Profils en long dans le chenal au flot et au jusant

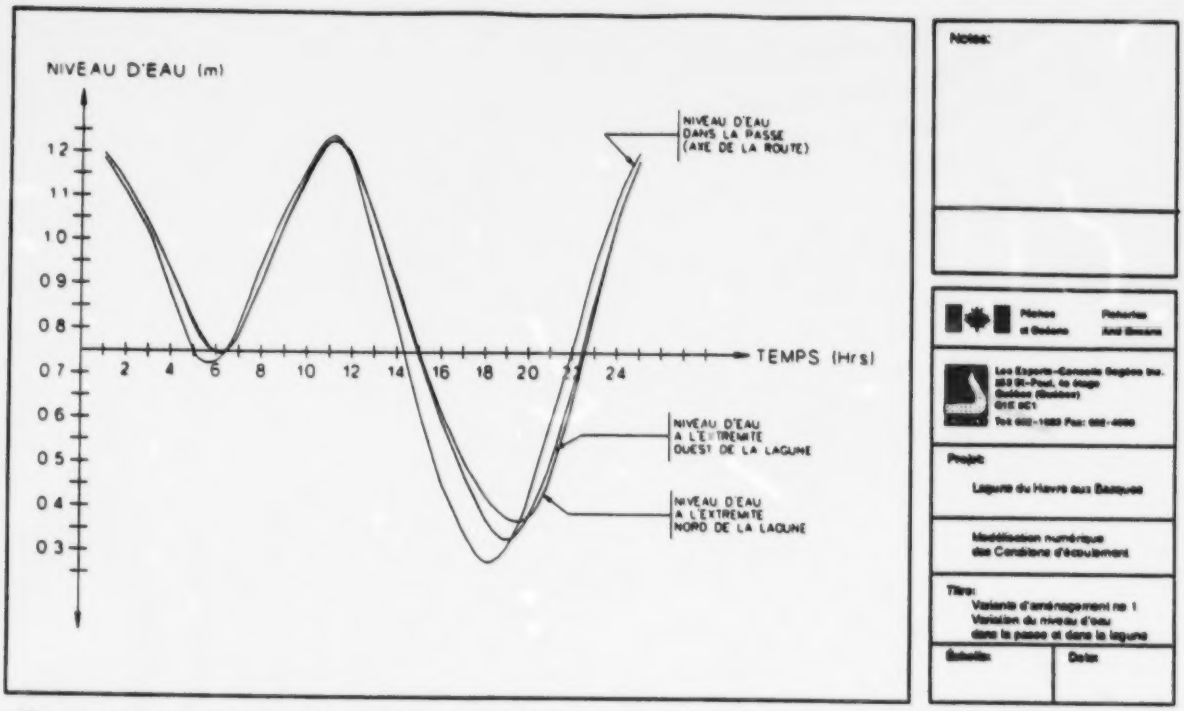


Figure 40 – Variante d'aménagement no 2 – Variation du niveau d'eau dans la passe et dans la lagune

Tableau 3 Variante no 2: caractéristiques de la marée en trois points du domaine

Position du point dans le domaine modélisé	Marnage (m)	*Déphasage approximatif par rapport à la baie de Plaisance (heure)
Axe de la route	0,96	0,5
Extrémité nord du modèle	0,85	2,0
Extrémité Ouest du modèle	0,90	1,5

* Ces valeurs correspondent à des points situés aux limites du modèle (figure 19) et non aux extrémités réelles de la lagune. Ainsi, le point à l'extrémité nord du modèle est situé à environ 3 km plus au sud que l'extrémité réelle de la lagune, correspondant aux zones de prés salés. Ces différences entre les limites du domaine discret et naturel qui avaient été justifiées pour établir la schématisation des volumes, doivent être gardées à l'esprit lors de l'examen des déphasages.

VARIANTE D'AMÉNAGEMENT NO 3

Description de la variante

L'étude des variantes d'aménagement nos 1 et 2 a permis d'établir les profondeurs, la largeur et l'emplacement du chenal d'accès. Les résultats des simulations se sont avérés satisfaisants en regard de la stabilité générale du chenal, les forces tractrices au droit de l'axe de la route étant inférieures à la limite d'arrachement des sédiments de fond. La variante no 2 présentait cependant, certaines lacunes en ce qui a trait aux conditions d'écoulement à l'entrée du chenal du côté de la lagune (ouest).

Afin de combler ces lacunes et d'assurer des conditions d'approche plus favorables, une variante supplémentaire est proposée. La figure 41 illustre cette nouvelle variante. Il s'agit d'un chenal présentant une largeur et une orientation identiques à celles préconisées pour la variante no 2. Les modifications sont locales et concernent la géométrie des coins à l'entrée ouest ainsi qu'un réaménagement de la bathymétrie dans le même secteur. Il s'agit d'un élargissement des massifs d'enrochement au niveau des coins de manière à décaler vers l'ouest l'ouverture de la passe. La géométrie a été choisie de manière à produire une restructuration des courants le long de la rive lors la période de jusant.

Modèle géométrique

La nouvelle géométrie définie par la variante no 3 a été implantée selon une procédure identique à celle utilisée pour la variante no 2. Les modifications au maillage ont été apportées de manière à assurer une représentation fidèle du domaine illustré sur la figure 41 et un niveau de discrétisation adéquat. Le plan d'aménagement illustré sur la figure 41 résume entièrement les caractéristiques de la variante. Les nouvelles longueurs de rives sont constituées de perrés d'enrochement et ont été associées à la classe granulométrique (type de frottement) correspondante. En plus de la restructuration des berges à l'entrée immédiate de la passe, un prolongement du talus d'enrochement a été préconisé sur la rive sud de manière à éliminer dans ce secteur les mouvements de berges potentiels observés pour la variante no 2.

La figure 42 illustre le maillage de la variante no 3. Il possède 1 322 éléments et 2 777 noeuds. La figure 43 illustre la bathymétrie discrétisée qui sera utilisée lors des calculs numériques. Les structures bathymétriques correspondent fidèlement à celles présentes sur la figure 41. Similairement à la variante no 2, les niveaux des différents plateaux ont été fixés à la cote -5,5 m et -3,5 m.

Simulation

La simulation a été réalisée en utilisant une marée de référence identique à celle préconisée jusqu'à maintenant, et avec les mêmes valeurs octroyées aux coefficients de frottement et de viscosité turbulente.

Présentation et analyse des résultats

Les résultats présentés dans cette section sont du même type que ceux fournis précédemment. Pour ce cas-ci, la représentation des trajectoires d'écoulement constitue une information de premier plan pour évaluer efficacement les conditions d'approche. Les trajectoires, qui sont calculées à partir du champ de vitesse obtenu de la simulation, représentent le chemin que prendrait un flotteur déposé dans l'écoulement en un point donné. Elles nous permettront, comme nous le verrons plus loin, d'évaluer l'angle d'approche de l'écoulement au droit de l'axe de la future structure.

Les résultats obtenus sont globalement semblables à ceux déjà présentés pour la variante no 2. Ils conservent les mêmes caractéristiques d'ensemble et par conséquent un niveau de stabilité identique.

Vitesses d'écoulement. Les figures 44 et 45 illustrent les vecteurs courants calculés au flot et au jusant.

Le patron général de d'écoulement est analogue à celui obtenu pour la variante no 2. L'intensité des courants de flot et de jusant est identique. Les seules modifications se situent à l'entrée ouest du chenal alors qu'on remarquera une restructuration des courants en rive qui sont réorientés vers le centre du chenal en raison de la nouvelle géométrie des rives. Cette constatation apparaîtra avec plus d'évidence lors de l'examen des trajectoires d'écoulement.

Forces tractrices. Du point de vue des forces tractrices, l'aménagement de la passe fournit un niveau d'efficacité similaire à celui de la variante no 2. Comme précédemment, les zones les plus sollicitées se retrouvent dans la partie est du chenal, du côté de la baie de Plaisance (figures 46 et 47). Au niveau de l'axe de la route, l'intensité est limitée à 2,5 Pa, à l'exception des talus d'enrochement où on retrouve des valeurs supérieures à 4 Pa. Ces valeurs plus importantes en rives sont compatibles à l'expression de la force tractrice et sont obtenues en raison de profondeurs plus faibles sur la frontière et d'une valeur de "n" plus importante pour les éléments associés aux talus d'enrochement.

Partage des débits. L'évolution du débit aux trois sections est quasi-identique à celle obtenue pour la variante no 2, ce qui démontre bien le caractère local des dernières modifications.

Prisme de marée. Une valeur de 14 968 000 m^3 est obtenue pour le prisme de marée.

Lignes d'eau et niveaux d'eau. Les lignes d'eau dans la passe, calculées au jusant et au flot, sont tracées sur la figure 48. Les marégrammes calculés aux trois points de référence définis précédemment, sont illustrés sur la figure 49.

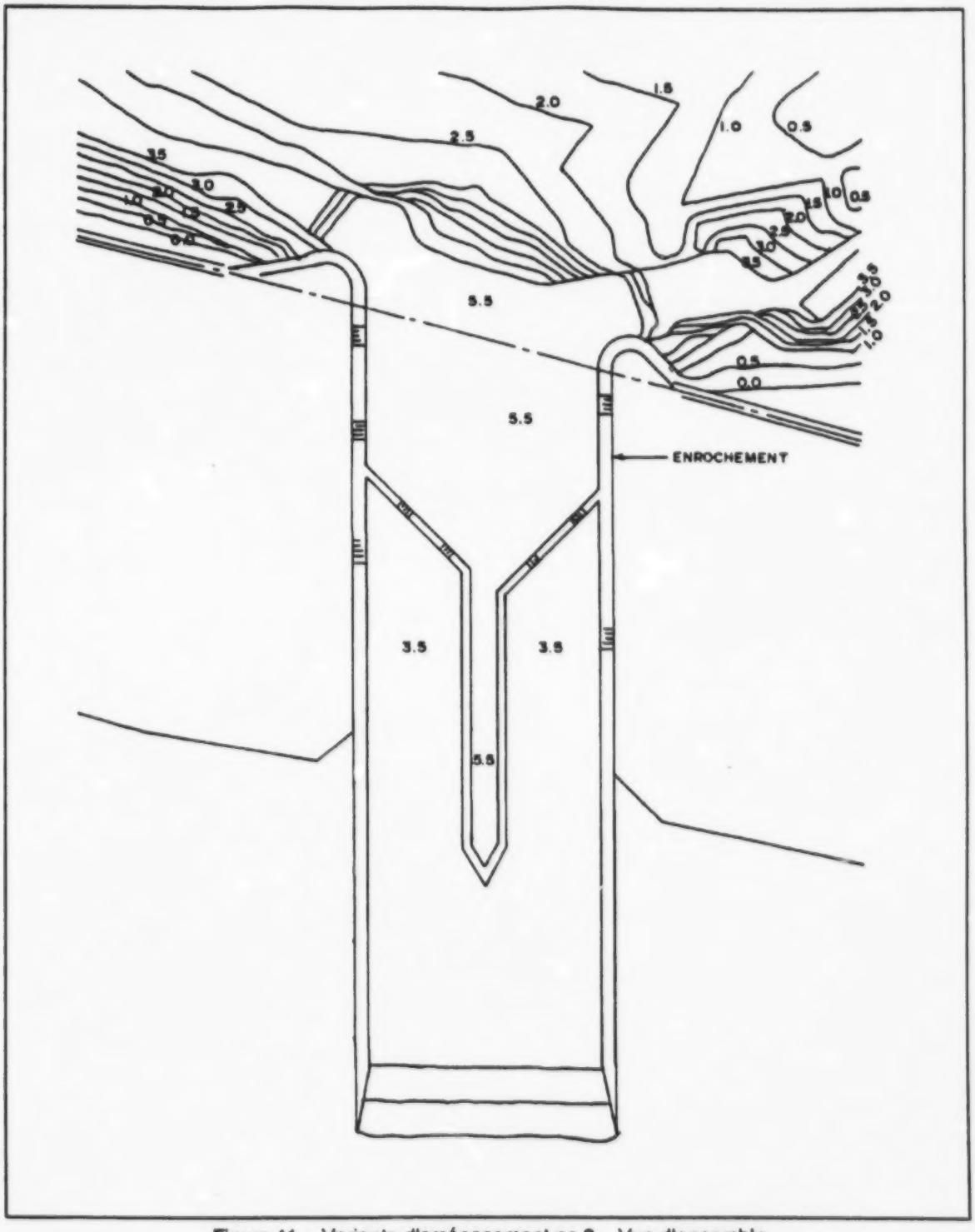


Figure 41 - Variante d'aménagement no 3 - Vue d'ensemble

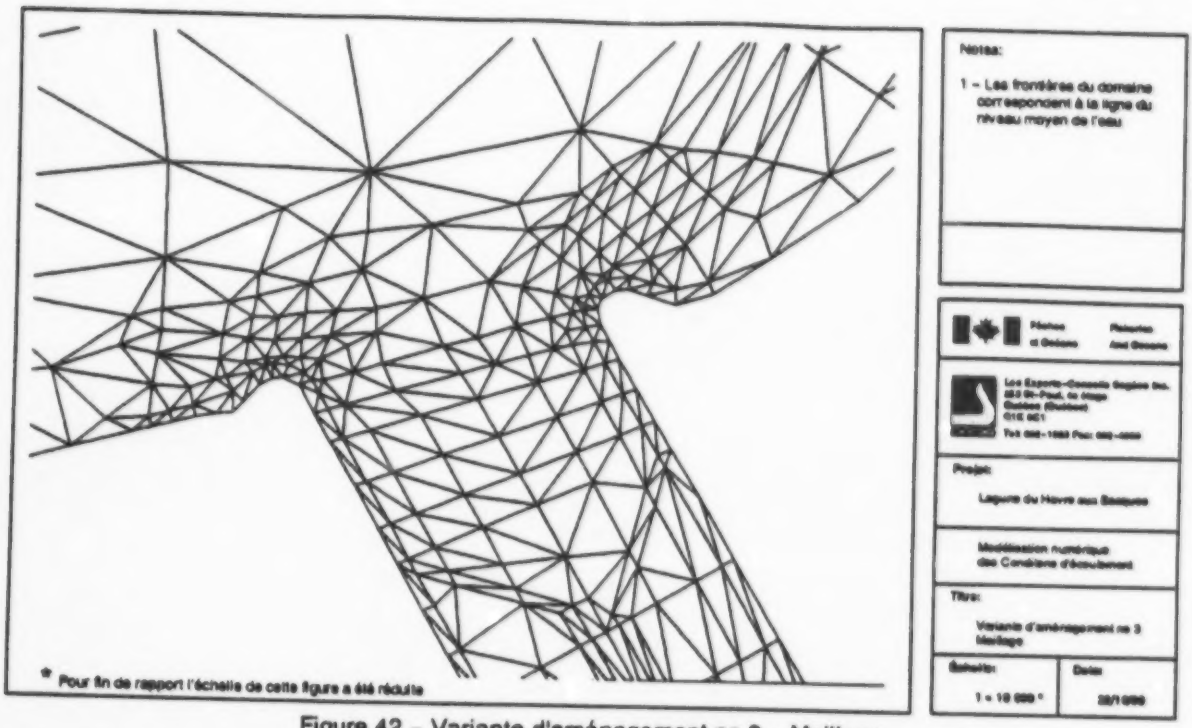


Figure 42 – Variante d'aménagement no 3 – Maillage

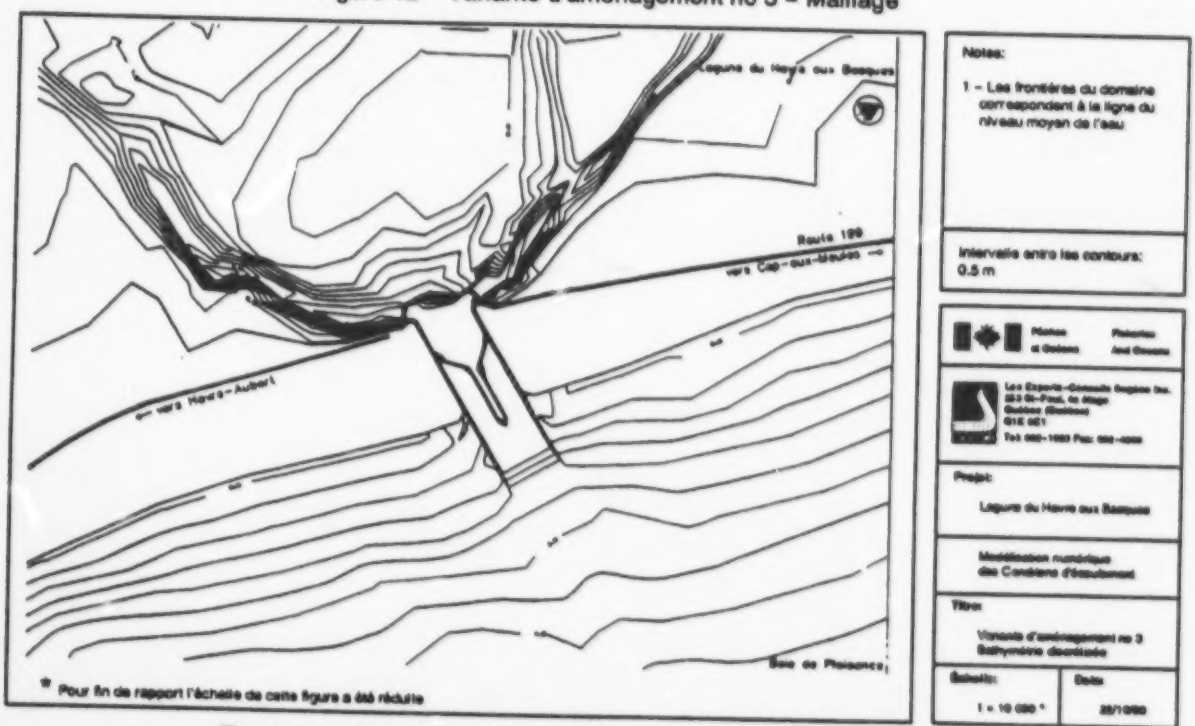


Figure 43 – Variante d'aménagement no 3 – Bathymétrie discrétisée

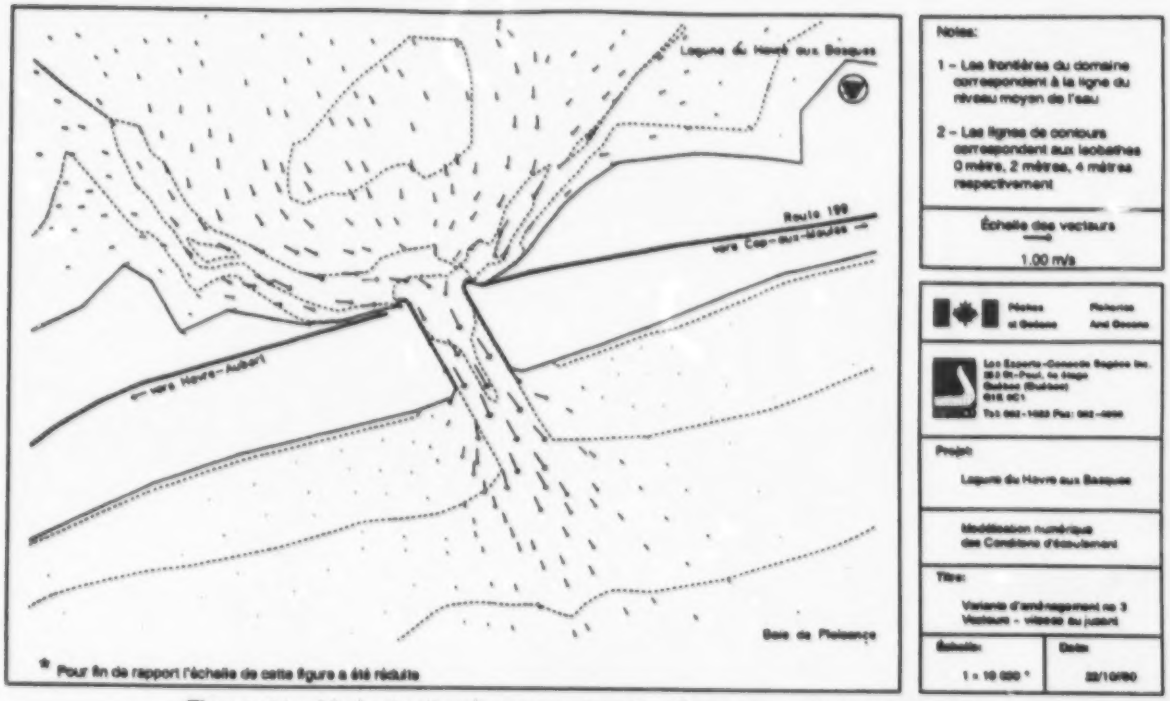


Figure 44 – Variante d'aménagement no 3 – Vecteurs – vitesse au jusant

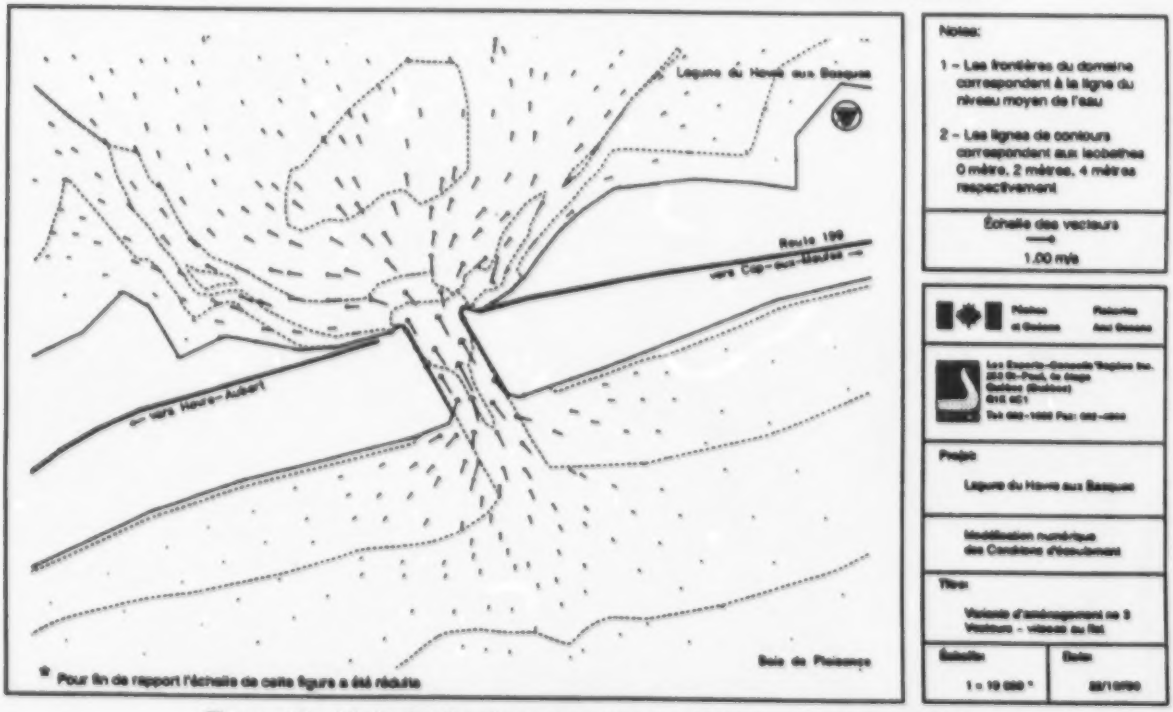


Figure 45 – Variante d'aménagement no 3 – Vecteurs – vitesse au flot

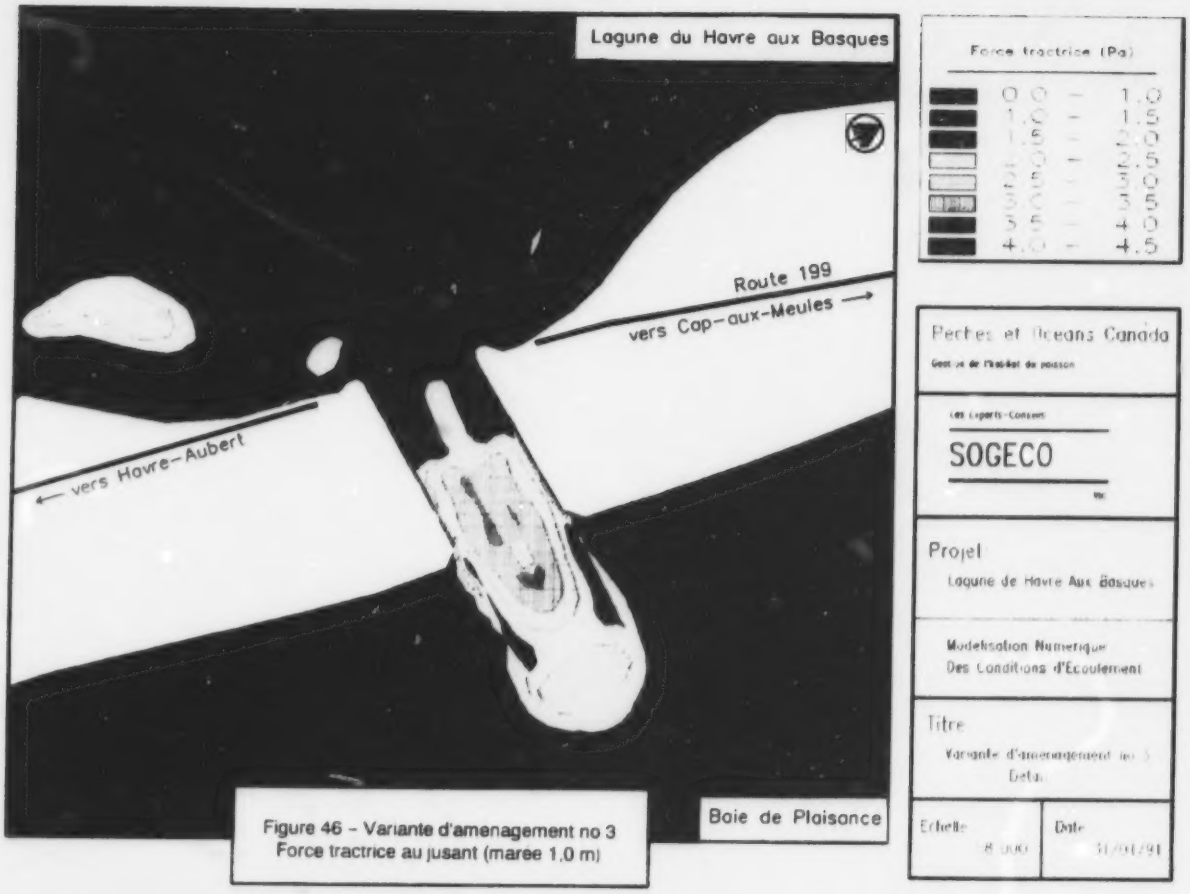


Figure 46 - Variante d'amenagement no 3
Force tractrice au jusant (marée 1,0 m)

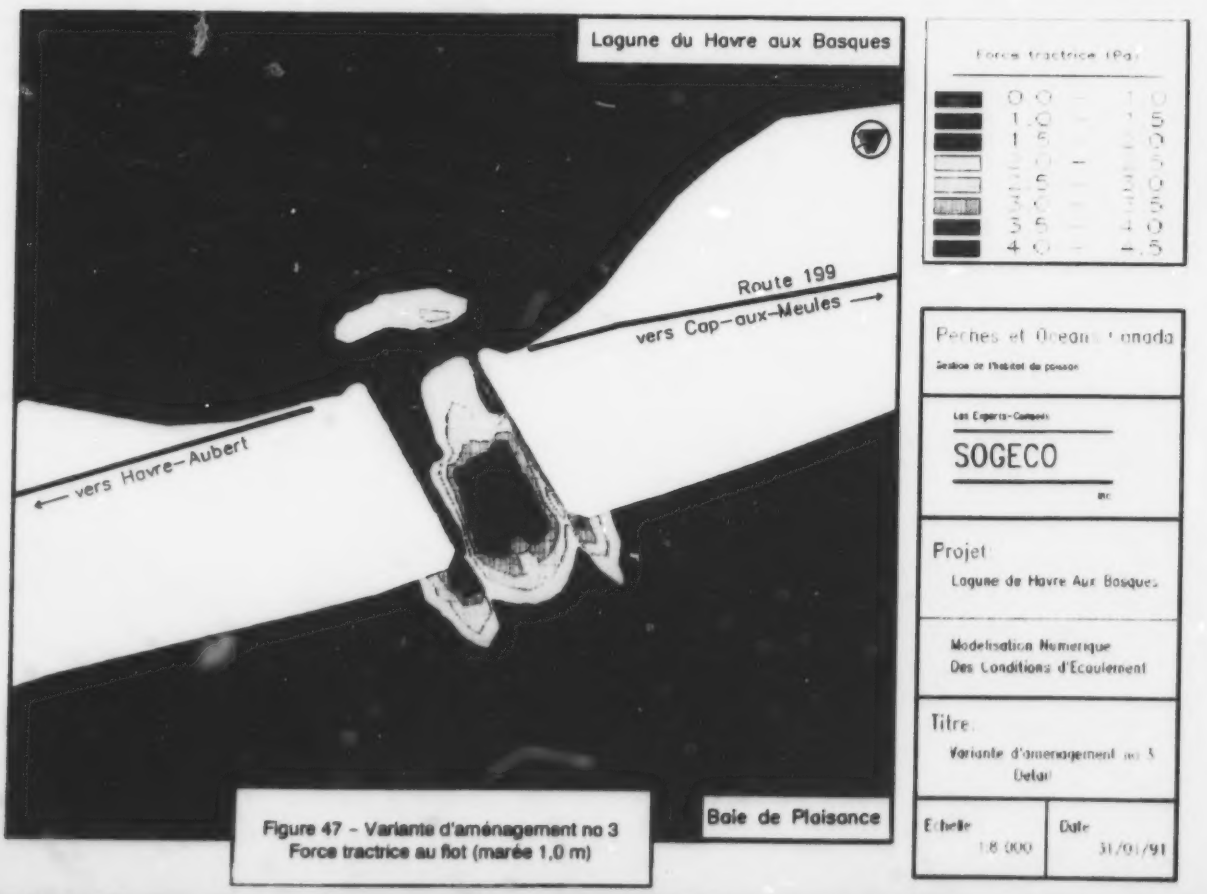
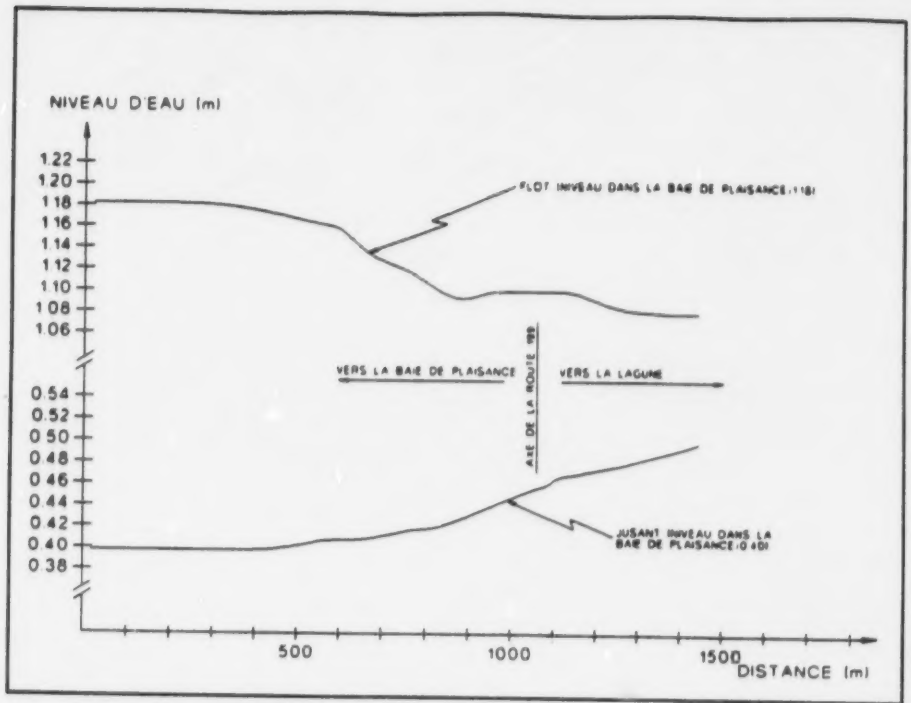


Figure 47 - Variante d'aménagement no 3
Force tractrice au flot (marée 1,0 m)



Notes:

Pêches et Océans / Fisheries and Oceans

Les Experts-Conseils Segesco Inc.
213 St-Paul, 4e étage
Québec (Québec)
G1K 6C1
Tél: 692-1668 Fax: 692-4999

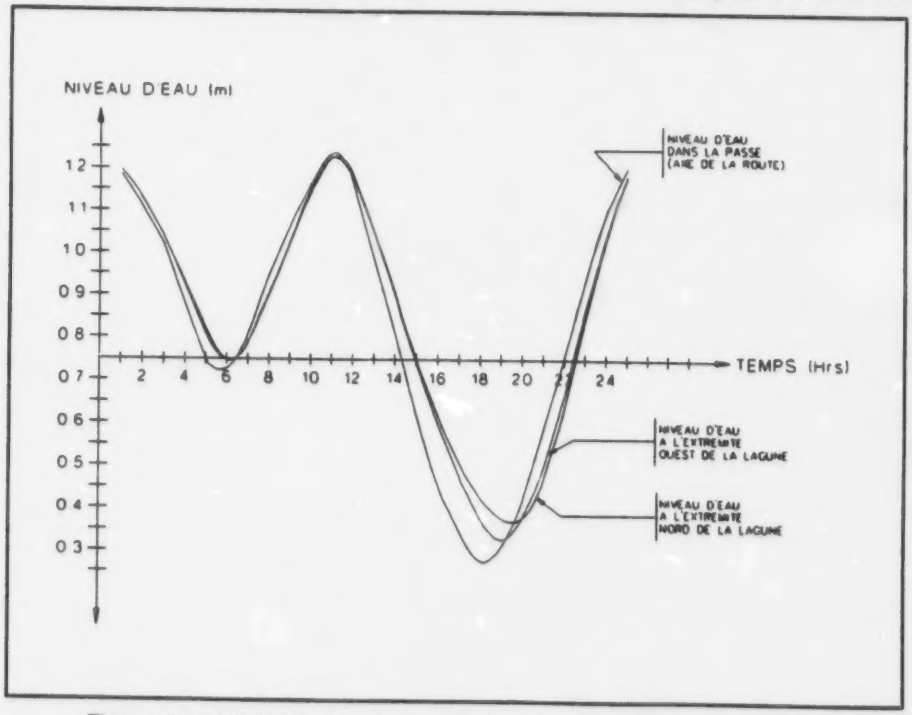
Projet:
Lagune du Havre aux Basques

Modélisation numérique des Conditions d'écoulement

Titre:
Variante d'aménagement no 3
Profils en long dans le chenal au flot et au jusant

Échelle: Date:

Figure 48 – Variante d'aménagement no 3 – Profils en long dans le chenal au flot et au jusant



Notes:

Pêches et Océans / Fisheries and Oceans

Les Experts-Conseils Segesco Inc.
213 St-Paul, 4e étage
Québec (Québec)
G1K 6C1
Tél: 692-1668 Fax: 692-4999

Projet:
Lagune du Havre aux Basques

Modélisation numérique des Conditions d'écoulement

Titre:
Variante d'aménagement no 3
Variation du niveau de l'eau dans la passe et dans la lagune

Échelle: Date:

Figure 49 – Variante d'aménagement no 3 – Profils en long dans la passe et dans la lagune

STABILITÉ DE LA PASSE - COMPARAISON ENTRE LES VARIANTES

Afin d'étudier plus efficacement la stabilité du chenal et comparer les variantes en ce sens, nous introduisons un nouveau type de résultats. Il s'agit de "l'indice de mouvement" des sédiments de fond dont l'expression est donnée comme suit:

$$I_m = \tau/\tau_c$$

I_m = indice de mouvement des matériaux en un point donné;

τ = force tractrice au point donné;

τ_c = contrainte critique des matériaux situés au point donné (2 Pa pour le sable; > 500 Pa pour les enrochements).

Cet indice nous permet d'établir la susceptibilité des sédiments à se déplacer. Les classes définies dans le tableau 4 ont été considérées pour fin d'analyse.

La représentation de l'indice de mouvement correspondant à ces quatre classes est fournie aux figures 50 à 55. Les deux premières illustrent les résultats obtenus pour la variante no 1, les deux suivantes correspondent à la variante no 2 alors que les deux dernières correspondent à la variante no 3.

L'examen de ces figures fait ressortir les points suivants.

Variante no 1 (figures 50 et 51)

Les surfaces présentant une grande susceptibilité au mouvement (classe 4) se retrouvent sur la presque totalité du chenal.

Du côté de la lagune, les berges à l'entrée du chenal présentent des indices de classe 4 durant la période de jusant.

À l'extérieur du périmètre de la passe, les indices sont inférieurs à l'unité et l'érosion des fonds due aux courants de marée sera de faible importance.

Cette variante d'aménagement présente donc certaines lacunes au niveau hydraulique et sédimentologique et ne garantit pas la stabilité des sédiments au voisinage de l'axe du futur pont.

Variante no 2 (figures 52 et 53)

Les surfaces associées à la classe 4 se retrouvent dans la section est du chenal. Près de l'axe du futur pont, l'indice diminue en-dessous de l'unité.

Au jusant, les rives à l'extrémité ouest du chenal sont bien protégées par les enrochements à l'exception du bras sud où on observe une zone de niveau 4, à la limite des enrochements et des talus existants.

Au flot, les coins de l'extrémité est de la passe présentent des indices de niveau 4.

Dans la partie est du chenal, les berges qui sont constituées du matériel en place auront tendance à s'adapter aux conditions réelles.

Le réaménagement de la bathymétrie proposé par la variante no 2 du côté de la lagune entraîne une réduction du mouvement des sédiments au niveau du pont par rapport à la variante no 1.

Du côté de la baie de Plaisance, les sollicitations demeurent importantes et des modifications sont à prévoir. Une reconfiguration dans la partie

est de la passe est à envisager et conduira à une géométrie similaire à celle de 1956, mais plus stable, compte tenu des enrochements prévus de part et d'autre du pont.

La variante no 2 garantit une plus grande stabilité au droit de l'axe de la route. Un prolongement des enrochements du côté sud devra cependant être réalisé pour éliminer la petite zone d'instabilité du côté sud (côté lagune).

Variante no 3 (Figures 54 et 55)

On y retrouvera pratiquement les mêmes zones que celles obtenues pour la variante no 2, avec une légère reconfiguration dans le voisinage de l'entrée de la passe. Tel qu'espéré le prolongement du talus d'enrochement en rive sud aura permis d'éliminer la petite zone d'instabilité présente dans la variante no 2.

Il est important de rappeler que les résultats obtenus correspondent à des conditions statiques définies pour un aménagement fixé. En réalité, les phénomènes naturels sont évolutifs et ne présentent pas ce caractère statique. Les processus d'érosion, de sédimentation et de stabilité des berges sont couplés aux variables hydrauliques qui elles-mêmes se verront modifier suite à la restructuration des fonds et de la géométrie de la passe. Ainsi les conditions stabilisées pourraient différer de celles proposées par une quelconque variante.

ORIENTATION DES COURANTS AU DROIT DU FUTUR PONT

REPRÉSENTATION PAR TRAJECTOIRES D'ÉCOULEMENT

La représentation par trajectoires d'écoulement constitue une information de premier plan pour évaluer efficacement les conditions d'approche au droit de l'axe de la route. Les trajectoires, qui sont calculées à partir des champs de vitesses obtenues des simulations, représentent le chemin que prendrait un flotteur déposé dans l'écoulement en un point donné. Elles nous permettront, comme nous le verrons plus loin, d'estimer l'angle d'approche de l'écoulement avec l'axe de la route.

Conformément à la demande de Pêches et Océans, des trajectoires d'écoulement ont été calculées pour les variantes d'aménagement nos 2 et 3. Treize trajectoires ont été amorcées au droit de l'axe de la route avec un espacement de 15 m, soit deux trajectoires par travée de 30 m.

Tableau 4 Définition des classes pour l'indice I_m

Classe	I_m	Susceptibilité au mouvement
1	0 - 0,5	très faible
2	0,5 - 1,0	faible
3	1,0 - 1,5	modérée
4	> 1,5	forte

Variante no 2

La figure 56 illustre les trajectoires d'écoulement calculées au jusant pour la deuxième variante. On remarque les caractéristiques générales de l'écoulement relatées lors de l'analyse des vecteurs courants. L'effet de "jet" du côté est de la passe y est particulièrement bien illustré. Plus localement, on observe une importante réorientation des courants à l'extrémité ouest de la passe. Cette dernière remarque s'applique plus particulièrement aux trajectoires situées près des rives alors qu'on retrouve des angles d'approche relativement faibles. Le tableau 5 résume les angles entre les trajectoires et la normale avec l'axe de la route lors du jusant. Durant le flot, l'écoulement qui est dirigé vers l'intérieur de la lagune conservera, à la limite ouest de la passe, des trajectoires assez rectilignes et orientées suivant l'axe du chenal. La figure 57 illustre les trajectoires calculées durant le flot, alors que le tableau 6 précise les angles d'approche.

Variante no 3

Pour cette variante, le tracé des trajectoires d'écoulement calculées au flot et au jusant est illustré sur les figures 58 et 59. On remarquera, par superposition des résultats correspondant aux variantes nos 2 et 3, un redressement des lignes vers le centre de la passe induit par la nouvelle géométrie des berges. Les angles inscrits entre l'axe de la route et les trajectoires, sont maintenant très près de 90°, et l'écoulement résultant est plus uniforme que celui de la variante no 2.

Tableau 5 Angles inscrits entre les trajectoires d'écoulement et la direction normale à l'axe de la route - condition de jusant

Distance mesurée depuis la rive sud (m)	* Angle en degré (°)
15	31
30	30
45	26
60	24
75	21
90	16
105	13
120	10
135	-3
150	-4
165	-10
180	-14
195	-19

* Angle positif dans le sens anti-horaire

Tableau 6 Angles inscrits entre les trajectoires d'écoulement et la direction normale à l'axe de la route – condition de flot

Distance mesurée depuis la rive sud (m)	* Angle en degré (°)
15	25
30	24
45	22
60	20
75	18
90	16
105	14
120	12
135	10
150	7
165	3
180	1
195	–4

* Angle positif dans le sens anti-horaire

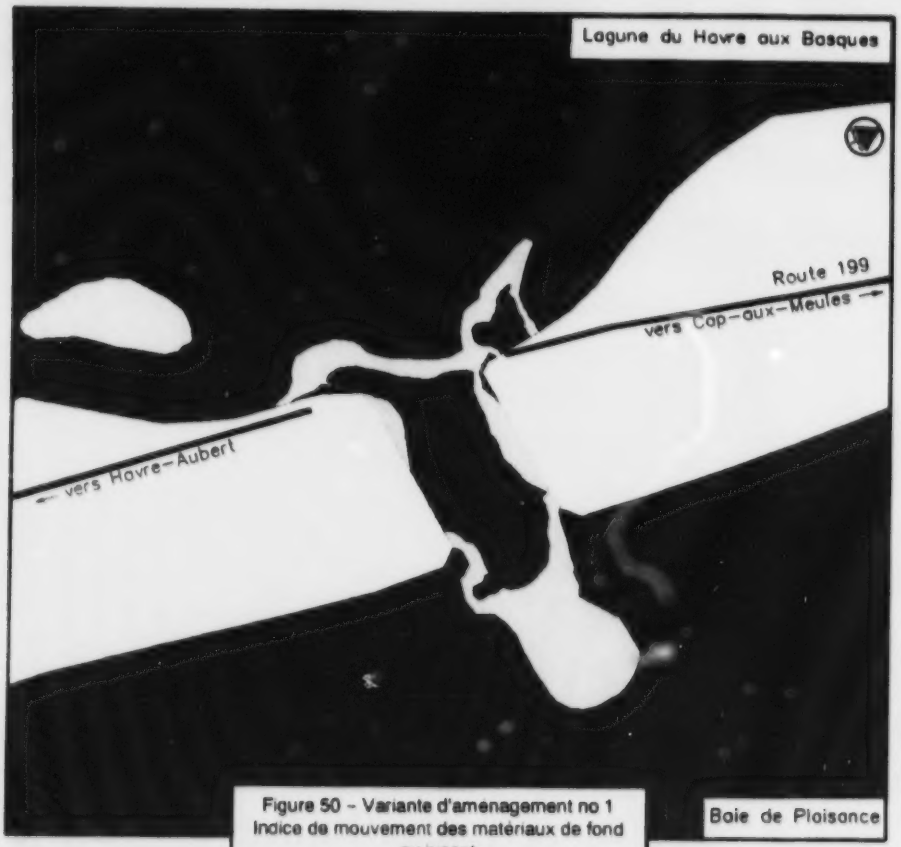
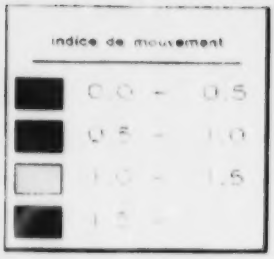
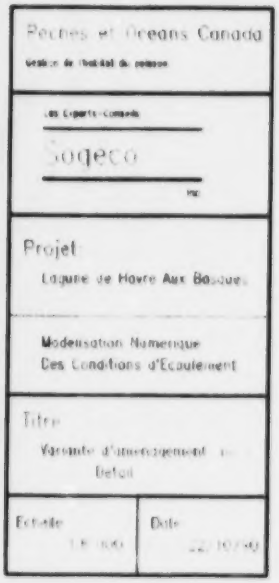


Figure 50 - Variante d'amenagement no 1
Indice de mouvement des matériaux de fond
au jusant





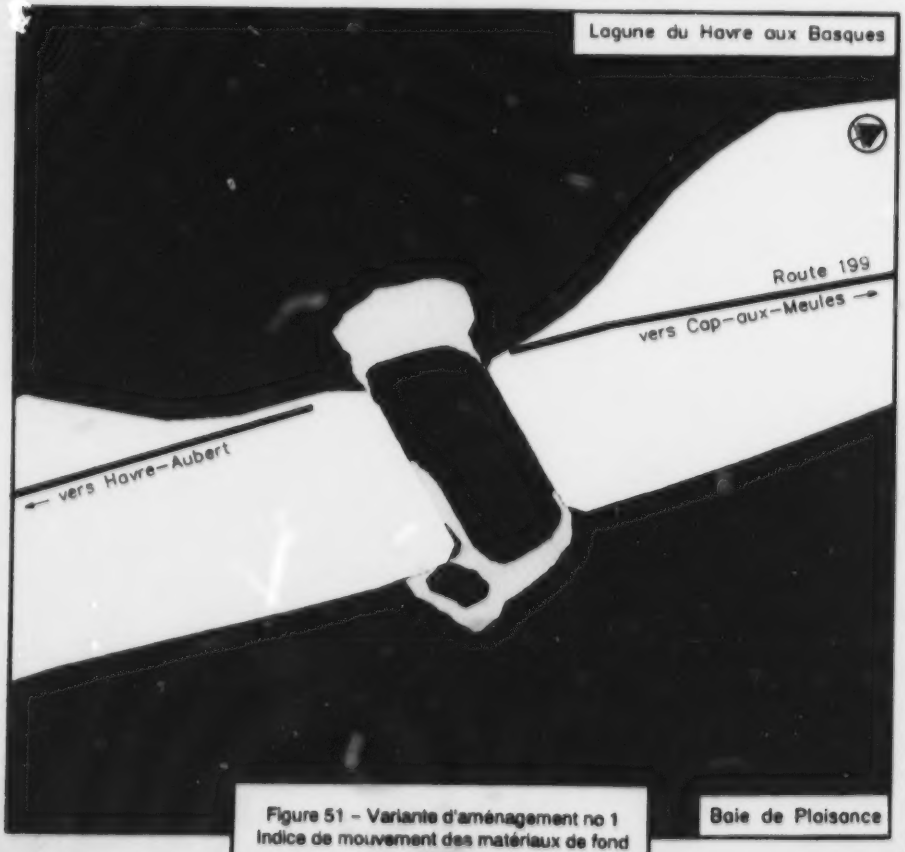
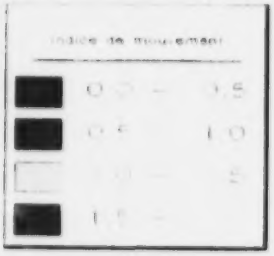
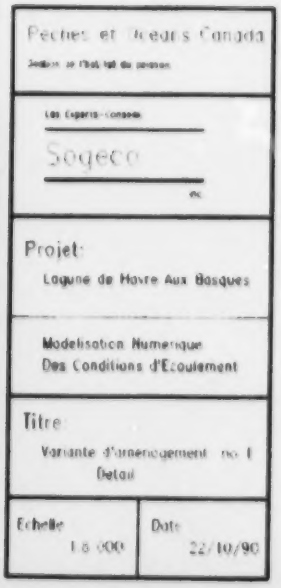


Figure 51 - Variante d'aménagement no 1
Indice de mouvement des matériaux de fond
au flot





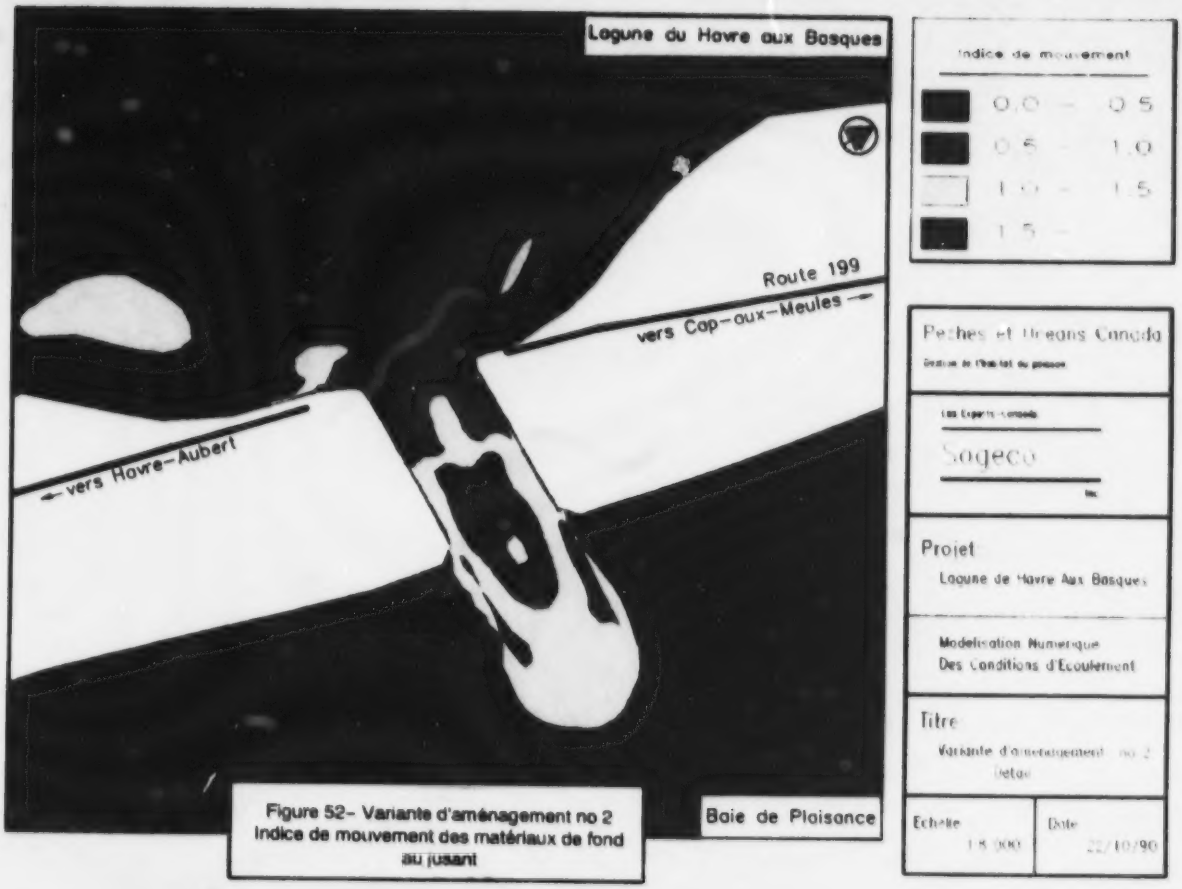


Figure 52- Variante d'aménagement no 2
Indice de mouvement des matériaux de fond
au jusant

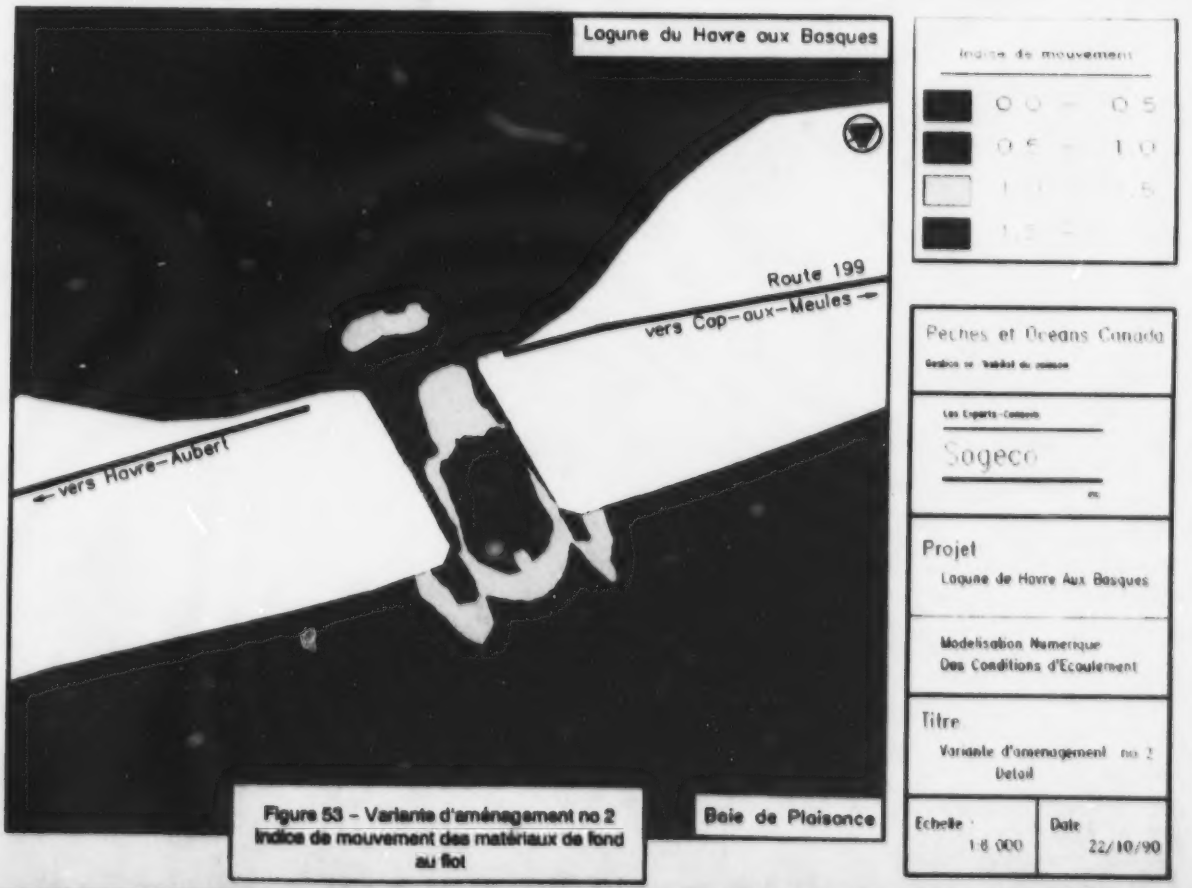


Figure 53 - Variante d'aménagement no 2
Indice de mouvement des matériaux de fond
au flot

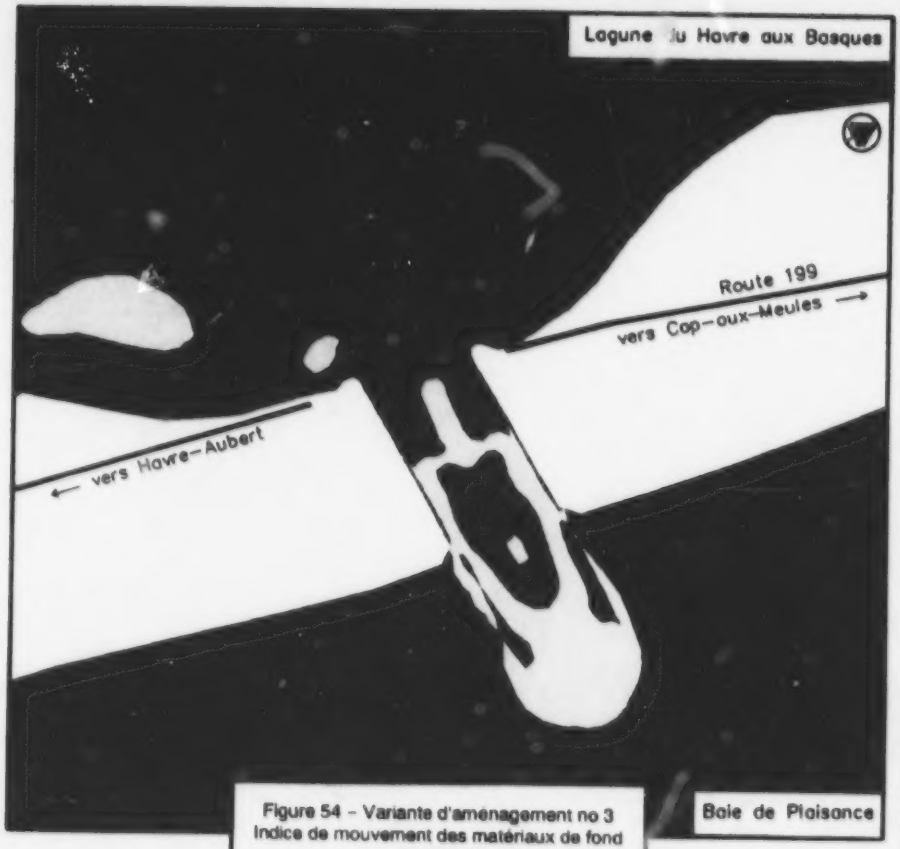


Figure 54 – Variante d'aménagement no 3
Indice de mouvement des matériaux de fond
au jusant

Indice de mouvement

0.0 – 0.5
0.5 – 1.0
1.0 – 1.5
1.5 – 2.0

Pêches et Océans Canada
Gestion de l'habitat du poisson

Les Experts-Conseils
SOGECO inc

Projet
Lagune de Havre Aux Basques

Modélisation Numérique
Des Conditions d'Écoulement

Titre
Variante d'aménagement no 3
Détail

Échelle 1:8 000
Date 31/01/91

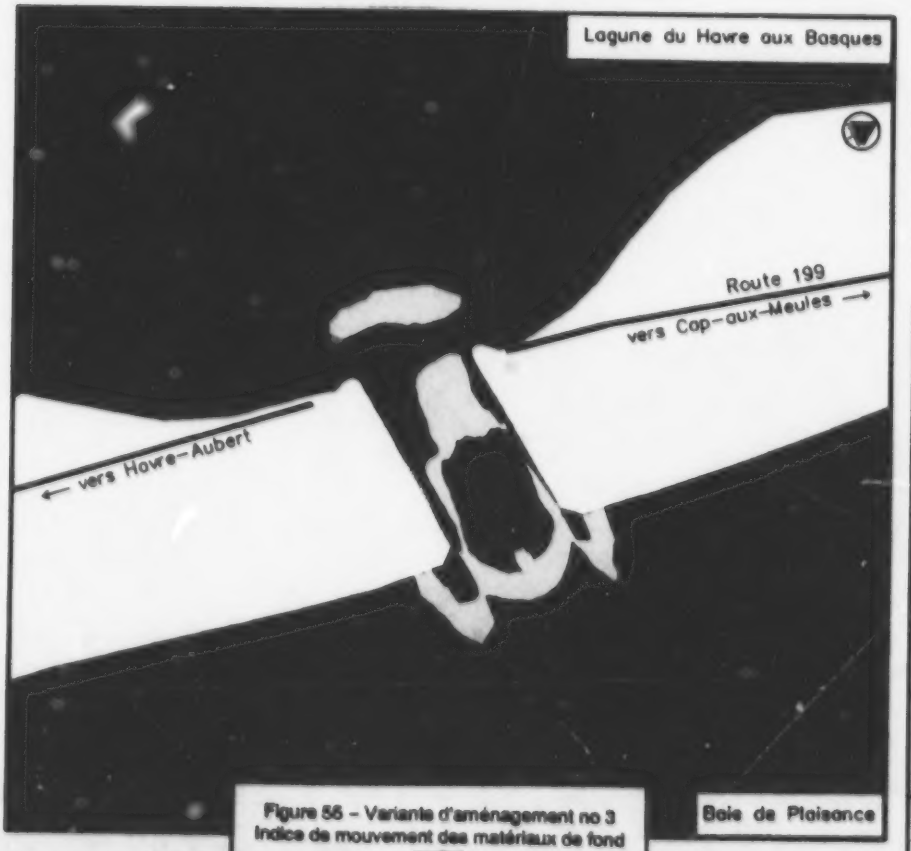


Figure 55 – Variante d'aménagement no 3
Indice de mouvement des matériaux de fond
au flot

Indice de mouvement

0.0 – 0.5
0.5 – 1.0
1.0 – 1.5
1.5 – 2.0

Pêches et Océans Canada
Gestion de l'habitat du poisson

Les Experts-Conseils
SOGECO inc

Projet
Lagune de Havre Aux Basques

Modélisation Numérique
Des Conditions d'Écoulement

Titre
Variante d'aménagement no 3
Détail

Échelle 1:8 000
Date 31/01/91

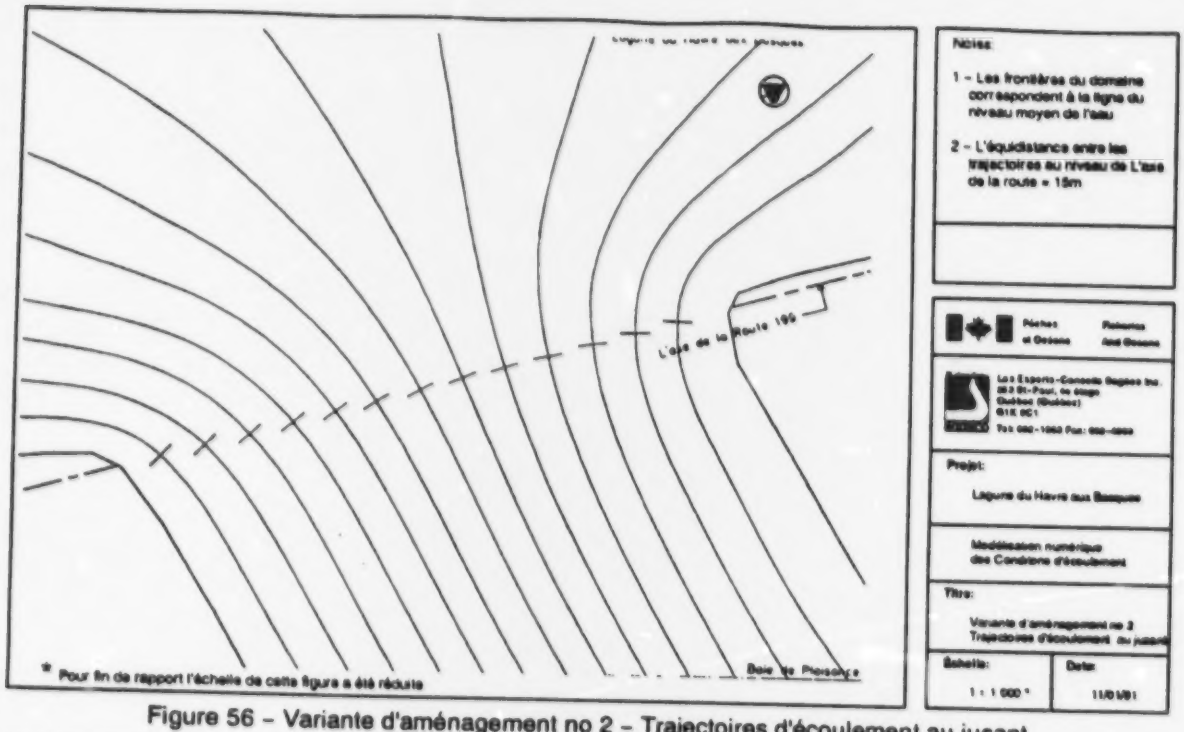


Figure 56 – Variante d'aménagement no 2 – Trajectoires d'écoulement au jusant

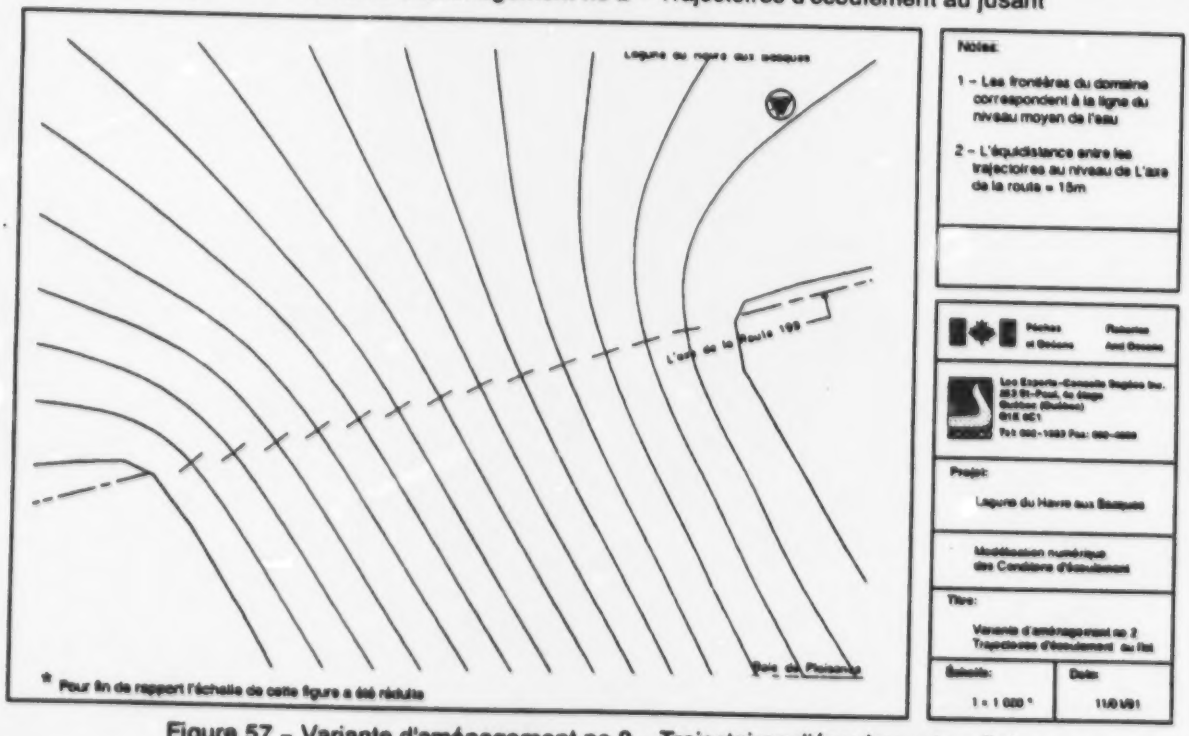


Figure 57 – Variante d'aménagement no 2 – Trajectoires d'écoulement au flot

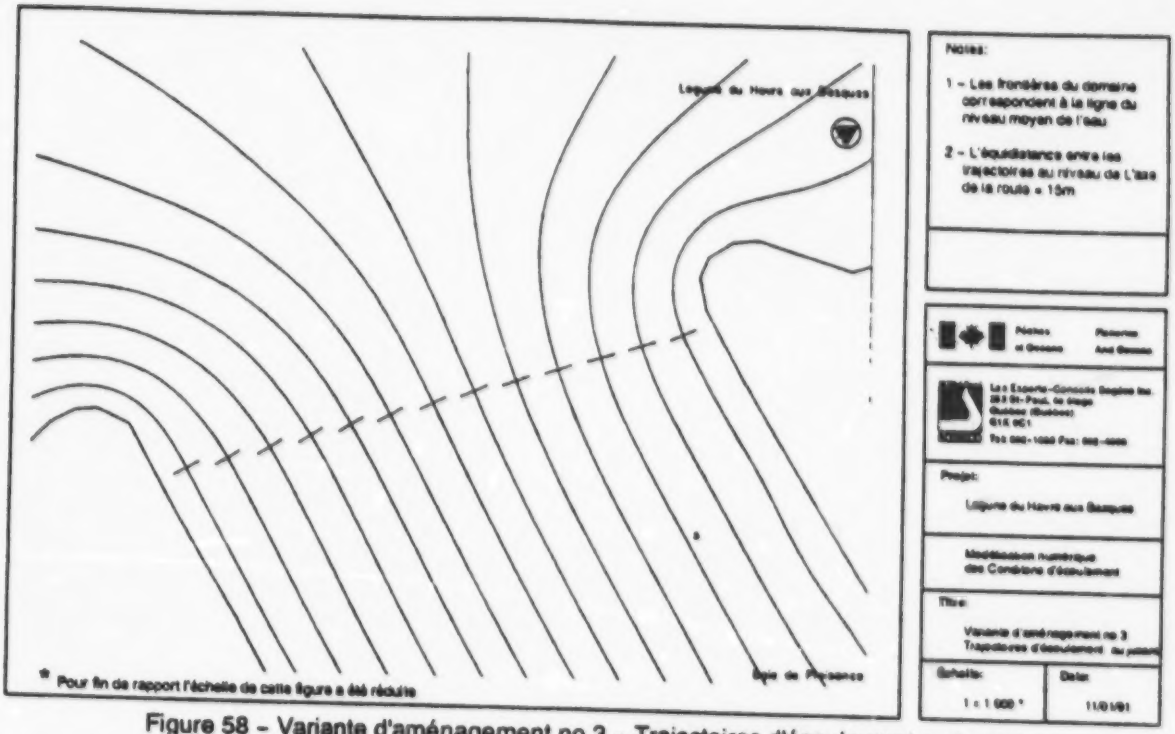


Figure 58 – Variante d'aménagement no 3 – Trajectoires d'écoulement au jusant

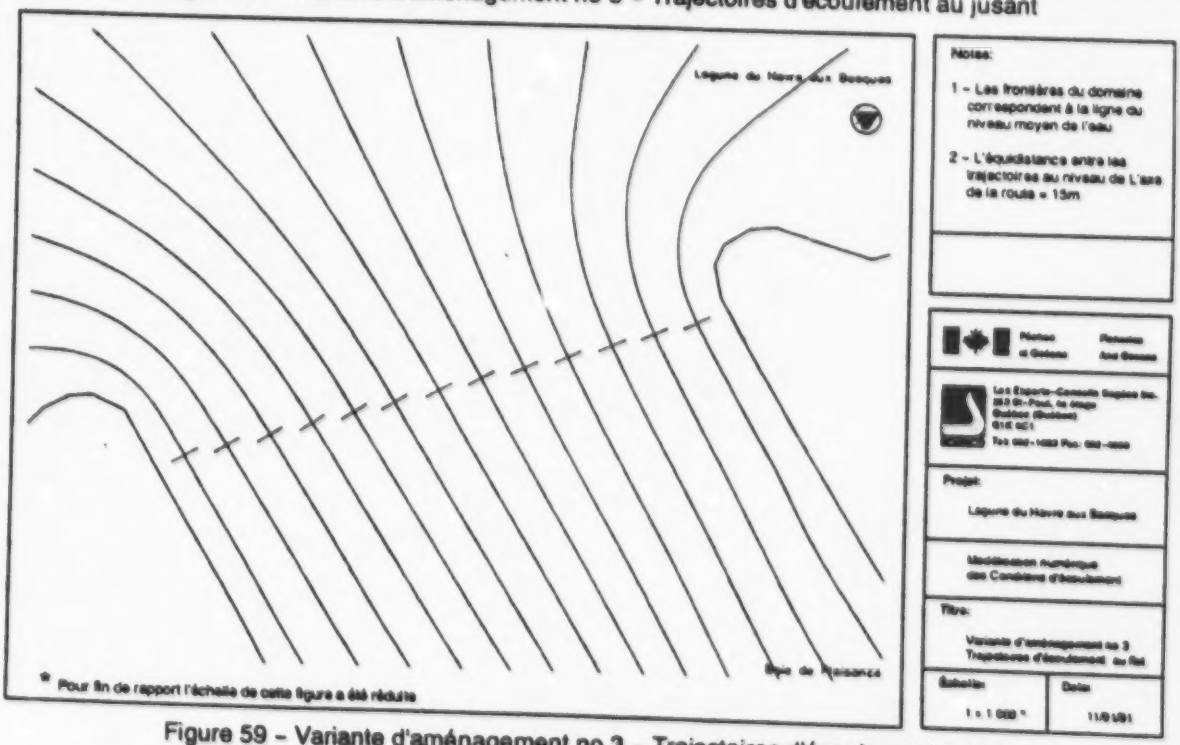


Figure 59 – Variante d'aménagement no 3 – Trajectoires d'écoulement au flot

la bathymétrie dans le même secteur. Ce remodelage réalise, en fait, un décalage de l'entrée de la passe vers l'ouest ce qui permet d'amoindrir l'angle d'incidence entre l'écoulement et la future structure. Les simulations ont révélées, en superposant les résultats des trajectoires d'écoulement des variantes nos 2 et 3, un redressement des lignes vers le centre de la passe induit par la nouvelle géométrie des berges.

ORIENTATION DES COURANTS AU DROIT DE L'AXE DE LA ROUTE

L'orientation des courants au droit de l'axe de la route a été déterminée à partir des trajectoires d'écoulement. Ce résultat, qui permet d'apprécier les angles des courants à l'approche du futur pont, a été présenté pour la variante d'aménagement no 2. Treize trajectoires espacées de quinze mètres ont été disposées dans le chenal au niveau de l'axe du pont. Pour les conditions de jusant, les angles entre la direction normale à l'axe de la route et les trajectoires varient entre -19° et 31°, les valeurs les plus grandes étant obtenues près des rives. Au flot, les angles sont plus faibles, avec des valeurs comprises entre -4° et 25°. Pour la variante no 3, les angles inscrits entre l'axe de la route et les trajectoires sont maintenant près de 90° ce qui en résulte un écoulement plus uniforme que celui de la variante no 2.

RECOMMANDATIONS

L'examen des résultats révèle une condition de stabilité des sédiments (sous l'action des courants) supérieure dans le cas des variantes nos 2 et 3. Un éventuel choix de la variante no 1 ne garantirait pas la stabilité à court terme des sédiments au droit de l'axe de la route. Cette dernière variante qui n'est pas à rejeter à priori, pourrait, ultérieurement, retrouver une configuration similaire à celle qui prévalait en 1956, suite à l'action des agents naturels. Cependant, la période de temps requise pour achever un tel processus demeure difficilement évaluable et le contrôle de la géométrie finale de la passe n'est pas garanti. Les variantes nos 2 et 3 assurent une géométrie plus stable à court terme et sont recommandables en ce sens. Cependant, les simulations de la variante no 3 ont révélé un redressement des lignes vers le centre de la passe ce qui résulte en un écoulement moins turbulent autour des piliers du futur pont.

Des protections suffisantes devront être prévues pour assurer la stabilité même des piliers du pont, en regard aux problèmes d'érosion et d'affouillement.

RÉFÉRENCES

BELLEMARE, J.F., (1991) Théorie et application du modèle HYDMEF, ouvrage en rédaction.

BOUDREAULT A., BELLEMARE, J.F., LECLERC,M. et G. SHOONER (1988) Projet Sainte-Marguerite - Avant-projet - Phase 1. Étude des répercussions du détournement de la rivière aux Pékans sur le saumon de la Moisie. Rapport sectoriel II présenté à la Vice-présidence Environnement d'Hydro-Québec.

CARLIER, M. (1980) Hydraulique generale et appliquée, Eyrolles, Paris, 565 p.

CHOW, V.T. (1959) Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill, New York, 680 p.

COCHET, J.F. (1979) Modélisation d'écoulements stationnaires et non-stationnaires par éléments finis, thèse de doctorat, Université Laval, Québec.

DESCHESNE, C. (1986) Simulation par elements finis d'un écoulement interne turbulent avec le modèle k-∈. Thèse, Université Laval, Quebec, 127 p.

DHATT, G. et G. TOUZOT. (1981) Une présentation de la méthode des éléments finis, Presse de l'Université Laval, Québec.

FRENETTE, M. (1978) Hydraulique des cours d'eau, notes de cours GCI-15201, département de génie civil, Université Laval, Québec, 300 p.

LECLERC M., BELLEMARE J.F. et S. TRUSARD. (1990) Simulation hydrodynamique de l'estuaire supérieur du fleuve Saint-Laurent (Canada) avec un modèle aux éléments finis couvrant-découvrant.

LES CONSULTANTS ST-LAURENT. (1987) Analyse des données de niveau d'eau de la lagune du Havre aux Basques, rapport présenté à Pêches et Océans Canada, 46 p.

MERCIER, O. (1986) Modèle géomorphologique dynamique du littoral de l'archipel des Îles-de-la-Madeleine, mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 336 p.

MORRIS, H.M. et J.M. WIGGERT. (1972) Applied hydraulics in engineering, John Willey & Sons Inc., New York, 629 p.

OUELLET, Y. (1975) Hydraulique maritime, notes de cours GCE-75-10-01, département de génie civil, Université Laval, Québec.

OUELLET, Y. (1990) Hydrodynamique des estuaires, notes de cours GCI-60334, département de génie civil, Université Laval, Québec.

OUELLET, Y., DUPUIS, P. et A. SOULAÏMANI (1986) Modélisation d'un écoulement tourbillonnaire en régime permanent. Revue canadienne de génie civil. Vol 13.

OUELLET, Y, ROPARS, Y. (1989) Étude hydrosédimentologique de la réouverture de la lagune du Havre aux Basques, rapport présenté à Pêches & Océans Canada, Québec, 78 p. et annexes.

PÊCHES ET OCÉANS CANADA. (1989) Tables des marées et courants du Canada, Golfe du St-Laurent, vol. 2, 41 p.

RODI, W. (1980) Turbulence models and their application in hydraulics, State-of-the-art review, AIR'H, DELFT, 101 p.

SOGEAM (1985) Étude de faisabilité de la réouverture de la lagune du Havre aux Basques aux Îles-de-la-Madeleine. Rapport présenté à Pêches et Océans Canada, 118 p.

SOULAÏMANI, A. (1985) Nouveaux aspects de la méthode des éléments finis en hydrodynamique, thèse de maîtrise (M.Sc.A), département de génie civil, Université Laval.

TAO SIMULATIONS. (1986) Impacts potentiels sur le poulamon atlantique à la traversée du fleuve Saint-Laurent de la ligne Radisson/Nicolet/Des Cantons: modélisation du milieu physique, rapport technique présenté à Hydro-Québec, 170 p.

TAO SIMULATIONS. (1989) Modélisation numérique des écoulements dans les biefs en amont et aval de LG 1, étude technique réalisée par la SEBJ, 81 p. et annexes.

WALTERS, R.A. et R.T. CHENG (1980) Accuracy of an estuarine hydrodynamic model using smooth elements. Water Ressources Research, 16(1), p. 187-195.

ANNEXE

DESCRIPTION DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE

LA FORMULATION DU MODÈLE

Le logiciel utilisé est un modèle numérique bidimensionnel incorporant les fonctionnalités nécessaires au calcul des écoulements à surface libre à l'aide de la méthode des éléments finis. Les équations de base découlent d'une intégration des équations de Navier-Stokes en régime turbulent dans la direction verticale, ce qui permet la prise en compte de la bathymétrie du cours d'eau. On obtient ainsi un modèle bidimensionnel particulièrement bien adapté pour les écoulements gravitationnels dans les eaux peu profondes (Cochet, 1979; Walters & Chang, 1980; Soulaïmani, 1985) puisque les inconnus calculés représentent la valeur moyenne dans l'axe vertical.

Le modèle utilisé est basé sur les équations de Saint-Venant décrivant le principe de conservation de la quantité de mouvement, et l'équation de continuité pour la conservation de la masse. Le tableau 7 présente ces relations. L'application du modèle présuppose une pression hydrostatique sur l'ensemble du domaine, ce qui signifie que:

- le modèle s'applique aux ondes longues;
- les accélérations verticales sont faibles relativement aux effets de la gravité.

Tableau 7 Relations de base du modèle numérique

Conservation de la quantité de mouvement (Saint-Venant)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + g\frac{\partial h}{\partial x} = F_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + g\frac{\partial h}{\partial y} = F_y$$

$$F_x = -\frac{gn^2|V|u}{H^{4/3}} + f_c v + \nu_t \Delta u + \frac{C_w \rho_a}{\rho H}|W|W_x$$

$$F_y = -\frac{gn^2|V|v}{H^{4/3}} - f_c u + \nu_t \Delta v + \frac{C_w \rho_a}{\rho H}|W|W_y$$

Continuité (Saint-Venant):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} = 0$$

C_w	:	coefficient de traînée du vent;
F_x ou F_y	:	résultantes des forces massiques exercées sur une particule d'eau selon x ou y;
f_c	:	coefficient de Coriolis;
H,h	:	profondeur totale et hauteur d'eau (H = h + z);
n	:	coefficient de Manning;
|V|	:	module de vitesse;
$W_x W_y$	:	composantes du vecteur vitesse du vent;
(x,y)	:	coordonnées cartésiennes; lorsque les forces de Coriolis sont prises en compte, x est orienté à l'est et y au nord;
ρ_a	:	masse spécifique de l'air;
ν_t	:	coefficient de viscosité turbulente;
Δ	:	opérateur laplacien;
u, v	:	composantes du vecteur vitesse respectivement selon les axes x et y;
g	:	accélération gravitationnelle;
ρ	:	masse volumique de l'eau.

La viscosité turbulente est spécifiée constante ou décrite par une relation algébrique "à zéro-équation" de type "longueur de mélange" (Rodi, 1980) qui relie la viscosité du fluide aux gradients de vitesse et à une longueur de mélange caractéristique:

$$\nu_t = \nu_{base} + l_m^2 \sqrt{2[(\frac{\partial u}{\partial x})^2 + 2(\frac{\partial v}{\partial y})^2 + (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})^2]}$$

l_m : longueur de mélange;
ν_{base}: viscosité minimum requise pour assurer la convergence du modèle.

La valeur l_m est reliée à la profondeur d'eau et à la discrétisation du domaine. Sa valeur, ainsi que celle de ν_{base}, doit être calibrée, ce qui requiert une bonne connaissance du comportement de l'écoulement pour un événement de référence.

Le coefficient de Manning, qui permet la prise en compte du phénomène de frottement, est relié principalement à la nature du fond. Le comportement hydraulique du cours d'eau ainsi que la discrétisation utilisée sont des facteurs qui peuvent aussi influencer la valeur de ces paramètres.

Les conditions aux limites

Les conditions aux limites sont les informations requises au modèle numérique pour assurer la résolution du problème traité. Elles s'appliquent sur les contours du domaine à modéliser et prennent généralement une des formes suivantes:

- l'imperméabilité et le glissement tangentiel au littoral:

$$u_N = 0$$
$$\tau_{NT} = f(u_T)$$

- l'adhérence et l'imperméabilité sur la frontière s'exprime par:

$$u_N = u_T = 0$$

où
u_N : vitesse normale;
u_T : vitesse tangentielle;
τ_{NT} : contrainte tangentielle sur les berges.

- Débit ou hauteur d'eau à l'amont du domaine;

$$\int_s Hu_N ds = Q_s$$

$$h = h_s$$

Q_s : le débit à la frontière ouverte à l'amont;
s : la frontière considérée;
H : profondeur d'eau;
h : niveau d'eau;
h_s : valeur imposée du niveau d'eau.

- Hauteur d'eau et vitesse tangentielle nulle;

$$h = h_s$$
$$u_T = 0$$

Formulation variationnelle

Une forme variationnelle du type Galerkine est obtenue en pondérant la formulation variationnelle par la première variation des inconnues. La fonctionnelle du mouvement est pondérée par la première variation des vitesses et celle de continuité par la première variation de la hauteur d'eau. Le modèle variationnel s'exprime comme suit:

$$W = \int_A <\delta u>\{R(u)\}dA = 0 \quad \text{pour tout } \delta u$$

A : le domaine d'intégration;
W : forme intégrale globale;
δu : les premières variations des inconnues.

Ce modèle est réduit à une forme dite "faible" en effectuant une intégration par partie des termes de contraintes turbulentes de Reynolds. Le résultat, équivalent à la forme initiale, est cependant plus pratique, les dérivées, d'ordre deux au départ, devenant d'ordre un après l'intégration.

Discrétisation - Approximation des inconnues

La discrétisation conduit à l'obtention de systèmes algébriques matriciels élémentaires qui sont ensuite assemblés dans un système matriciel global.

Notre approche consiste à utiliser comme élément de base un triangle à 6 noeuds.

- approximation quadratique des composantes de la vitesse u et v;
- approximation linéaire des hauteurs d'eau et de la bathymétrie;
- approximation linéaire de la géométrie dans le plan.

Cet élément présente une très bonne stabilité numérique et des solutions exemptes d'oscillations (Cochet, 1979; Walters & Cheng, 1980; Dhatt, et-al., 1981). La résolution temporelle du problème est assurée par un schéma d'Euler implicite tandis que la non-linéarité reliée aux termes convectifs et de frottement se calcule par un processus itératif de type Newton-Raphson.

Résumé des principales caractéristiques du modèle

Les caractéristiques de base du modèle numérique hydrodynamique sont les suivantes:

- le modèle de base est celui pour "eau peu profonde" ("shallow water equation"); il est décrit par les équations de Saint-Venant;
- les variables sont les composantes de la vitesse moyenne (intégrée sur la verticale) et la hauteur d'eau;
- la pression est considérée comme hydrostatique (hypothèse des ondes longues);
- les effets de la turbulence verticale sont négligés;
- la discrétisation utilise la méthode des éléments finis et l'élément de base est un triangle à 6 noeuds (T-6);
- les composantes de la vitesse sont représentées par une approximation quadratique et la hauteur d'eau par une fonction linéaire;
- la méthode de résolution non linéaire est du type Newton-Raphson;
- la méthode d'Euler implicite permet la résolution non-stationnaire;
- la bathymétrie est approximée linéairement et la formulation du modèle permet la prise en compte de formes discontinues.